

---

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – FACULTAD REGIONAL MENDOZA

**TESIS:**

**“IMPACTO DE LAS EMISIONES DE AEROSOLE  
SOBRE LAS PRECIPITACIONES DE  
LOS ANDES CENTRALES”**



Tesis Doctoral en Ingeniería  
2019



**ING. ROMINA MARÍA PASCUAL FLORES**

Director: Dr. S. Enrique Puliafito

---

"Nunca consideres el estudio como una obligación,  
sino como una oportunidad para penetrar  
en el bello y maravilloso mundo del saber"

*ALBERT EINSTEIN*



## AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen.

Al Dr. Enrique Puliafito, por brindarme la posibilidad de acompañarlo en este proyecto y realizar mi doctorado bajo su dirección. No solamente ha sido un excelente guía en lo académico y científico, sino también una compañía en lo personal.

A la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, por brindarme un lugar de trabajo, que poco a poco se convirtió en mi hogar.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la ayuda económica durante la realización de este doctorado.

Al Dr. Guy Brasseur y su equipo de trabajo (Max-Planck-Institut für Meteorologie), por su hospitalidad durante mi estadía en Hamburgo y su gran aporte a mi crecimiento profesional.

## DEDICATORIAS

A mi amor, Exequiel, por enseñarme que con una sonrisa todo se vuelve más fácil, por darme su inmenso amor y su contención en todo momento. Por confiar en mí, aun cuando yo no lo hago.

A mis padres, Raúl y Sandra por apoyarme en cada paso que doy y por depositar su confianza siempre en mí, aun cuando yo no la tuve. Por inculcarme la responsabilidad, la perseverancia, la alegría, y el amor en las tareas diarias. Por darme alas para despegar y alcanzar todo lo que me proponga.

A toda mi familia por creer en mí.

A mis amigos de siempre, por su constante estímulo. Por sostenerme en todo momento y darme alivio en los momentos más pesados.

A mis compañeros y amigos de trabajo que me acompañaron en este camino compartiendo todo su conocimiento, información y herramientas para el desarrollo de la tesis, pero también los que supieron darme palabras de aliento y apoyo en los momentos que más los necesité.

A ellos, con los que supimos entendernos mejor que nadie y a través de la amistad pudimos superar cada etapa: Florencia y Tomás.

Al Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales (GEAA) por dejarme formar parte de un grupo humano tan maravilloso durante estos años. Por cuidarme y contenerme siempre.

*Romi*

*En la actualidad, hay evidencia suficiente acerca de que los contaminantes atmosféricos antropogénicos tienen marcados efectos sobre los ecosistemas y la salud humana. En Argentina, se han coordinado actividades para evaluar y conocer estas emisiones. Aun así, teniendo en cuenta que la cuantificación y caracterización del impacto de las emisiones antrópicas de aerosoles a la atmósfera, posee todavía un alto grado de incertidumbre en lo relativo a la predicción del comportamiento de las variables meteorológicas, y por lo tanto en el clima; se ha intentado generar nuevos conocimientos y ampliar los existentes. Debido a que el debate público que involucra al cambio climático y sus efectos comienza a enfocarse en medidas de mitigación y acciones regulatorias, la comprensión y cuantificación de la influencia de las diferentes fuentes de emisión de aerosoles en el ciclo hidrológico, es de creciente interés, particularmente en zonas áridas o semiáridas como lo es la provincia de Mendoza, Argentina.*

*Los aerosoles están vinculados a la redistribución de la radiación solar, que influye en la variación térmica de la atmósfera, ocasionando alteraciones en las formaciones nubosas. Estos aerosoles afectan la microfísica de las nubes, y por ende desempeñan un rol crucial, además pueden alterar las precipitaciones y/o el tiempo de vida medio de las nubes afectando a mediano y largo plazo las condiciones climáticas (Hansen, 1997) (Twomey, 1991)(Jones, 1994) (Charlson et al., 1992). El impacto de la contaminación ambiental por emisiones de material particulado, se sumaría a los efectos del calentamiento global.*

*La incertidumbre debe ser reducida con el objeto de estimar de una mejor manera el impacto generado.*

*La posibilidad de dar respuestas significativas, es una de las razones para intensificar los esfuerzos de investigación. Mediciones y estudios numéricos recientes demuestran la existencia de un efecto significativo de las partículas de aerosol sobre la cantidad y la distribución espacial de las precipitaciones (Rosenfeld, 1999) (Ramanathan et al., 2001) (Andreae & Rosenfeld, 2008) (Givati & Rosenfeld, 2004)(Lynn, 2005)(Jirak & Cotton, 2006).*

*Algunos estudios han encontrado que la precipitación se ve reducida en áreas con alto grado de contaminación atmosférica (Rosenfeld, 2000) (Borys et al., 2000) (Freitas, 2005). Sin embargo otros hay encontrado aumento de precipitaciones alrededor de estas áreas (Shepherd & Burian, 2003)(Ohashi & Kida, 2002) (Vendrasco et al., 2009) (Artaxo, 1990). Esta controversia en los resultados probablemente se asocie a las condiciones ambientales de cada zona investigada, el grado de afectación ha de depender de la estabilidad atmosférica y, debido a esto, los efectos de los aerosoles sobre la precipitación pueden cambiar de acuerdo al lugar.*

*En esta tesis se presentan los primeros avances obtenidos acerca de esta problemática sobre el territorio argentino, el cual hasta ahora no ha sido explorado en detalle. Se describe el análisis sobre la incorporación de contaminantes antropogénicos a los*

*modelos de calidad de aire, para estudios de escala local y regional junto con el análisis de su influencia en los patrones de precipitación.*

*El estudio se abordó utilizando los modelos numéricos atmosféricos de meso-escala como el WRF (Weather Research and Forecasting) y el modelo fotoquímico acoplado WRF/Chem que incluyan las características distintivas de la meteorología, las fuentes de emisión antrópicas, urbanas e industriales y de quema de biomasa.*

*Las salidas de los modelos se contrastaron con estadística de precipitaciones de la zona de estudio para su validación. Los resultados fueron satisfactorios, ya que el modelo demostró su capacidad para reproducir eventos típicos de precipitación en una zona con topografía y meteorología complejas.*

*Se comenzó trabajando sobre diferentes configuraciones para evaluar el desempeño del modelo dinámico WRF en las simulaciones de precipitación. Y posteriormente, se ha trabajado con WRF-Chem en donde se han introducido inventarios de emisiones propios, elaborados en el Grupo GEAA, a través de una herramienta modificada previamente para conseguir una representación espacio temporal más detallada y adecuada a los dominios de trabajo. Se examinaron escenarios en condiciones limpias (sin aerosoles) y condiciones contaminadas a diferentes niveles (con inclusión de aerosoles) para eventos típicos de precipitación.*

*El trabajo realizado, demostró la capacidad de modelación local y regional de aerosoles y el modelo manifestó tener sensibilidad a la incorporación de los mismos. Al incluir los inventarios al modelo, se observó a escala local un leve aumento en la cantidad de precipitaciones de aproximadamente un 8%. En esta primera modificación al modelo, las partículas antropogénicas estarían actuando como núcleos de condensación (CCN) para la formación de gotitas de nube. Sin embargo, cuando las nubes se forman con altas proporciones de CCN en el aire, las partículas reducen la nube, reducen la coalescencia y conducen a una supresión de la precipitación (Andreae & Rosenfeld, 2008). Así se ha demostrado en esta investigación que tanto a nivel regional, como a nivel local un aumento en las cantidades de contaminantes presentes en la atmósfera provoca una disminución de precipitaciones en la zona. El grado de impacto parece ser sensible a la tasa de emisión. Para incrementos de contaminantes elevados en la provincia de Mendoza, los decrementos de lluvia alcanzan hasta el 60%.*

*Finalmente, se han empleado datos satelitales para llevar a cabo un análisis independiente de los ya realizados con modelación numérica, con el fin de evaluar si la presencia de material particulado, en mayor o menor grado, presentaba alguna influencia sobre los patrones de precipitación del territorio argentino. Se evaluó, en particular, el impacto de los incendios sobre los patrones de precipitación en Mendoza.*

*Al igual que los resultados obtenidos a través de la modelación, mediante el análisis a través de información satelital se pudo observar que a mayores cargas de material particulado (PM 2.5) presentes en la atmósfera, como consecuencia de incendios desarrollados en la zona, menores resultaron los registros de precipitación acumulada.*

## ABSTRACT

*At present, there is sufficient evidence that anthropogenic air pollutants have marked effects on ecosystems and human health. In Argentina, activities have been coordinated to evaluate and know these emissions. Even so, taking into account that the quantification and characterization of the impact of anthropogenic emissions of aerosols to the atmosphere, still has a high degree of uncertainty regarding the prediction of the behavior of meteorological variables, and therefore in the climate; an attempt has been made to generate new knowledge and expand existing ones. Because the public debate that involves climate change and its effects begins to focus on mitigation measures and regulatory actions, the understanding and quantification of the influence of the different sources of aerosol emissions in the hydrological cycle is of growing interest, particularly in arid or semi-arid zones such as the province of Mendoza, Argentina.*

*The aerosols are related to the redistribution of solar radiation, which influences the thermal variation of the atmosphere, causing alterations in the cloud formations. These aerosols affect the microphysics of the clouds, and therefore play a crucial role, they can also alter precipitation and the average life time of the clouds affecting weather conditions in the medium and long term (Hansen, 1997) (Twomey, 1991) (Jones, 1994) (Charlson et al., 1992). The impact of environmental pollution from emissions of particulate matter would be added to the effects of global warming.*

*The uncertainty must be reduced in order to estimate the impact generated.*

*The possibility of giving meaningful answers is one of the reasons for intensifying research efforts. Measurements and recent numerical studies demonstrate the existence of a significant effect of aerosol particles on the amount and spatial distribution of rainfall (Rosenfeld, 1999) (Ramanathan et al., 2001) (Andreae & Rosenfeld, 2008) (Givati & Rosenfeld, 2004) (Lynn, 2005) (Jirak & Cotton, 2006).*

*Some studies have found that precipitation is reduced in areas with a high degree of air pollution (Rosenfeld, 2000) (Borys et al., 2000) (Freitas, 2005). However, others have found increased rainfall around these areas (Shepherd & Burian, 2003) (Ohashi & Kida, 2002) (Vendrasco et al., 2009) (Artaxo, 1990). This controversy in the results is probably associated to the environmental conditions of each area investigated, the degree of affectation has to depend on the atmospheric stability and, due to this, the effects of the aerosols on the precipitation can change according to the place.*

*In this thesis the first advances obtained about this problematic on the Argentine territory are presented. It has not been explored in detail. The analysis on the incorporation of anthropogenic pollutants in air quality models is described, for studies of local and regional scale together with the analysis of their influence on precipitation patterns.*

*The study was carried out using atmospheric meso-scale numerical models such as the WRF (Weather Research and Forecasting) and the coupled photochemical model WRF / Chem that*

*include the distinctive features of meteorology, anthropogenic, urban and industrial emission sources and of biomass burning.*

*The model's outputs were contrasted with rainfall statistics from the study area for validation. The results were satisfactory, since the model demonstrated its capacity to reproduce typical precipitation events in an area with complex topography and meteorology.*

*The work was started on different configurations to evaluate the performance of the dynamic WRF model in precipitation simulations. And subsequently, work has been done with WRF-Chem where inventories of own emissions have been introduced, prepared in the GEAA Group, through a previously modified tool to achieve a more detailed time-space representation appropriate to the work domains. Scenarios were examined in clean conditions (without aerosols) and contaminated conditions at different levels (including aerosols) for typical precipitation events. The work done demonstrated the capacity of local and regional modeling of aerosols and the model showed sensitivity to the incorporation of them. When the inventories were included in the model, a slight increase in the amount of rainfall of approximately 8% was observed at the local scale. In this first modification to the model, the anthropogenic particles would be acting as condensation nuclei (CCN) for the formation of cloud droplets. However, when clouds form with high proportions of CCN in the air, the particles reduce the cloud, reduce coalescence and lead to a suppression of precipitation (Andreae & Rosenfeld, 2008). This has been shown in this research that both at the regional level and at the local level an increase in the amounts of pollutants present in the atmosphere causes a decrease in rainfall in the area. The degree of impact seems to be sensitive to the emission rate. For increases in high pollutants in the province of Mendoza, rainfall decreases reach up to 60%.*

*Finally, satellite data has been used to carry out an independent analysis of those already performed with numerical modeling, in order to assess whether the presence of particulate material, to a greater or lesser degree, had an influence on the precipitation patterns of the territory. Argentinian. In particular, the impact of the fires on rainfall patterns in Mendoza was evaluated.*

*As well as the results obtained through modeling, through analysis through satellite information it was observed that at higher loads of particulate material (PM 2.5) present in the atmosphere, as a consequence of fires developed in the area, fewer resulted the accumulated rainfall records*

---

---

# “Impacto de las emisiones de aerosoles sobre las precipitaciones en Los Andes Centrales”

## CONTENIDO

Agradecimientos y dedicatoria .....	3
Resumen .....	4
Abstract .....	6
Indice de Tablas .....	12
Indice de Figuras .....	13
 Capítulo I : INTRODUCCIÓN .....	 17
1.1. Descripción general de la atmósfera terrestre .....	17
1.2. Nubes y formación de gotas.....	17
1.3. Aerosoles atmosféricos .....	18
1.3.1. Distribución de tamaño de aerosoles .....	18
1.3.2. Propiedades e impactos en la dinámica atmosférica.....	20
1.3.3. Material particulado.....	22
1.4. Los Andes.....	23
1.4.1. Topografía de la región.....	23
1.4.2. Meteorología de la región.....	24
1.4.3. Calidad del aire en la región.....	25
1.5. Motivación de estudio.....	26
1.6. Hipótesis.....	27
1.7. Objetivos .....	27
1.7.1. Objetivo General .....	27
1.7.2. Objetivos .....	27
1.8. Metodología .....	28
1.9. Alcances y aportes de la tesis.....	28
 Capítulo II : MODELOS NUMÉRICOS .....	 29
2.1. Modelos numéricos aplicados para estudios de calidad de aire.....	29
2.1.1. Modelo meteorológico: Weather Research and Forecasting (WRF) .....	32
2.1.1.1. Modelo meteorológico acoplado con química: WRF-Chem.....	32
2.2. Dominios de simulación. Anidado .....	34
2.3. Resoluciones espaciales y temporales.....	34
2.3.1. Resolución espacial .....	34
2.3.1.1. Resolución horizontal .....	35



2.3.1.2. Resolución vertical.....	35
2.3.2. Resolución temporal.....	36
2.4. Dinámica .....	36
2.5. Bases estáticas.....	36
2.5.1. Topografía .....	36
2.5.2. Uso y cobertura del suelo (Land Use Land Cover – LULC).....	37
2.6. Bases dinámicas.....	37
2.6.1. Meteorología .....	37
2.7. Parametrizaciones físicas.....	37
2.7.1. Parametrización de superficie.....	38
2.7.2. Parametrización de capa límite planetaria (PBL) .....	40
2.7.3. Parametrización de microfísica de nubes .....	40
2.7.4. Parametrización de cúmulos o convección .....	40
2.7.5. Parametrización de radiación.....	41
2.8. Emisiones químicas.....	41
2.8.1. Emisiones antropogénicas .....	41
2.8.2. Emisiones naturales .....	41
2.8.3. Emisiones biogénicas.....	41
2.8.4. Emisiones por quema de biomasa .....	41
2.9. Inventarios de emisiones .....	42
2.9.1. Inventarios globales.....	42
2.9.2. Inventarios regionales .....	42
Capítulo III : MODELADO y CASOS DE ESTUDIO .....	44
3.1. Dominios de modelado .....	44
3.2. Configuración de modelo .....	45
3.2.1. Datos de entrada.....	46
3.2.1.1. Elevación del terreno .....	46
3.2.1.2. Uso y cobertura del suelo .....	46
3.2.1.3. Meteorología .....	46
3.2.2. Resolución.....	46
3.2.3. Física .....	46
3.2.3.1. Superficie.....	46
3.2.3.2. Capa límite.....	47
3.2.3.3. Microfísica .....	47
3.2.3.4. Radiación.....	47
3.2.4. Química .....	47
3.3. Períodos de simulación.....	48

3.4. Optimización de la configuración de WRF.....	49
3.4.1. Temperatura de la Superficie del Mar (SST).....	49
3.4.2. Esquemas de parametrización de cúmulos (ECP).....	52
3.5. Análisis estadísticos.....	57
3.5.1. Análisis cualitativo.....	57
3.5.1.1. Sesgo (BIAS).....	58
3.5.1.2. Probabilidad de detección – Tasa de éxito (POD).....	58
3.5.1.3. Tasa de falsa alarma (FAR).....	58
3.5.1.4. Probabilidad de detección falsa –Tasa de falsas alarmas (POFD) .....	59
3.5.1.5. Precisión – Fracción correcta (ACC) .....	59
3.5.1.6. Proporción de probabilidades (OR) .....	59
3.5.2. Análisis cuantitativo.....	59
3.5.2.1. Fracción de predicciones dentro de un factor de 2 observaciones (FAR2) .....	59
3.5.2.2. Error medio cuadrático (RMSE) .....	60
3.5.2.3. Sesgo Fraccional (FB) .....	60
3.5.2.4. Bias (BIAS) .....	60
3.5.2.5. Índice de acuerdo .....	60
3.6. Resultados estadísticos .....	61
3.6.1. Resultados estadísticos para SST.....	61
3.6.2. Resultados estadísticos para los ECP .....	63
3.7. Implementación del modelo acoplado con química WRF-Chem .....	66
3.7.1. Esquema de aerosol MOSAIC .....	66
3.7.2. Esquema de gas CBM-Z .....	66
3.7.3. Introducción de inventarios de alta resolución al modelo.....	66
3.8. Estudio de situación local: Precipitaciones en Mendoza.....	69
3.8.1. Estaciones meteorológicas.....	69
3.8.2. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM).....	70
3.8.3. Aerosoles atmosféricos.....	70
3.8.4. Precipitación vs. AOD.....	71
3.9. Simulación de un evento de precipitación.....	73
3.9.1. Condiciones atmosféricas.....	74
3.9.1.1. Condiciones atmosféricas para el mes de enero de 2013 .....	74
3.9.1.2. Condiciones atmosféricas para el evento comprendido entre el 26 y el 30 de enero de 2013 .....	76
3.9.2. Escenarios propuestos para la simulación del evento .....	78
3.10. Resultados: Aerosoles vs. precipitaciones con WRF-Chem .....	82
3.11. Comprobación .....	86
3.11.1. Base de datos de incendios.....	86
3.11.2. CHIRPS .....	87

3.11.3. Análisis de datos.....	88
3.12. Resultados: Incendios vs precipitaciones .....	90
3.13. Análisis de trayectorias con HYSPLIT .....	96
Capítulo IV : CONCLUSIONES .....	98
Referencias .....	101

## TABLAS

Tabla 1. Configuración del modelo WRF-Chem para las simulaciones de precipitaciones.....	48
Tabla 2. Quincenas simuladas con WRF-Chem para analizar efectos de las diferentes parametrizaciones sobre las precipitaciones acumuladas .....	48
Tabla 3. Fecha de los eventos simulados y analizados con WRF.....	49
Tabla 4. Tabla de contingencias. Los recuentos de a, b, c, y d son el número total de aciertos, falsas alarmas, errores y rechazos correctos.....	58
Tabla 5. Resultados de los cálculos estadísticos cualitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, SST_ON vs SST_OF.....	61
Tabla 6. Resultados de los cálculos estadísticos cuantitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, SST_ON vs SST_OF.....	62
Tabla 7. Resultados de los cálculos estadísticos cualitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, EXP (defecto), KF, BMJ, GD.....	63
Tabla 8. Resultados de los cálculos estadísticos cuantitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, EXP (defecto), KF, BMJ, GD.....	64
Tabla 9. Tabla4. Emisiones de todos los sectores para Argentina 2014 (Gg).....	67
Tabla 10. Características geográficas de las estaciones meteorológicas analizadas en el período 1983-2013.....	69
Tabla 11. Parámetros calculados (mm) con WRF-Chem para los diferentes escenarios en las escalas regional (dominio completo) y local (Mendoza).....	83
Tabla 12. Estadísticas para los sectores más significativos del área en estudio (emisiones en toneladas/año).....	90
Tabla 13. Promedios anuales de precipitaciones (mm) y de PM 2.5 (kg) obtenidos del análisis de datos satelitales para el territorio argentino en el período comprendido entre 2007 y 2017 .....	93
Tabla 14. Promedios mensuales de precipitaciones (mm) y de PM 2.5 (kg) obtenidos del análisis de datos satelitales para el territorio argentino en el período comprendido entre 2007 y 2017 .....	95

## FIGURAS

Figura 1. Distribuciones modales de tamaños de partículas.....	19
Figura 2. Esquema idealizado de distribución y procesos que afectan los aerosoles atmosféricos .....	20
Figura 3. Atmósfera y aerosoles: Panorama general.....	22
Figura 4. Climograma de las dos ciudades de mayor importancia en las laderas de Los Andes .....	25
Figura 5. Esquema conceptual de los modelos de calidad de aire .....	32
Figura 6. Diagrama de flujo del sistema de modelado WRF .....	33
Figura 7. Dominios anidados y sus interdependencias en WRF-Chem .....	34
Figura 8. Mallas horizontal y vertical del núcleo ARW .....	35
Figura 9. Coordenada $\eta$ del núcleo ARW para WRF.....	35
Figura 10. Balance radiativo.....	39
Figura 11. Noah LSM para WRF.....	39
Figura 12. Procesos de la capa límite planetaria.....	40
Figura 13. Dominios anidados definidos para las simulaciones. Región de estudio: Los Andes Centrales....	44
Figura 14. Cuencas hidrológicas de Argentina y Chile, dentro del área de estudio.....	45
Figura 15. Precipitación total acumulada para las configuraciones (a) SST_ON, (b) SST_OFF en WRF, para la quincena QC .....	50
Figura 16. Temperatura de superficie y datos de SST (°C) .....	50
Figura 17. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la segunda quincena del mes de enero de 2014 (QB) y diferencia entre ambas configuraciones.....	51
Figura 18. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la segunda quincena del mes de enero de 2013 (QF) y diferencia entre ambas configuraciones .....	51
Figura 19. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la primera quincena del mes de febrero de 2014 (QC) y diferencia entre ambas configuraciones.....	51
Figura 20. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la primera quincena del mes de febrero de 2013 (QH) y diferencia entre ambas configuraciones.....	52
Figura 21. Precipitación acumulada en el dominio de estudio, para un período de tiempo definido (segunda quincena del mes de febrero de 2014_QD), simulada con los diferentes ECP del modelo WRF versión 3.5 .....	53
Figura 22. Simulaciones de WRF de precipitación total acumulada (mm) con todas las variantes de ECP para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2014 en la quincena QD.....	54

Figura 23. Estructuras de velocidades verticales a 700mb para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2014 en la quincena QD.....	55
Figura 24. Perfiles verticales de humedad relativa para una latitud de 32.5°S y 22UTC para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2014 en la quincena QD.....	56
Figura 25. Distribución de parámetros estadísticos cualitativos por cuenca y para ambas configuraciones .....	61
Figura 26. Distribución de parámetros estadísticos cuantitativos por cuenca y para ambas configuraciones .....	62
Figura 27. Distribución de parámetros estadísticos cualitativos por cuenca y para las configuraciones de WRF propuestas, EXP (por defecto), KF, BMJ, GD .....	64
Figura 28. Distribución de parámetros estadísticos cuantitativos por cuenca y para las configuraciones de WRF propuestas, EXP (por defecto), KF, BMJ, GD .....	65
Figura 29. Distribución Espacial de PM2.5 para la (a) simulación por defecto y la (b) simulación con emisiones y IC/BC en alta resolución .....	68
Figura 30. Concentraciones de fondo de PM2.5 para la simulación por defecto en rojo y la optimizada en azul.....	68
Figura 31. Entrada para WRF-Chem: Inventario de CO-sector transporte con ambos inventarios unificados, EDGAR (global) y GEAA (regional) .....	68
Figura 32. Zoom Figura 13, provincia de Mendoza en el dominio pequeño d03.....	70
Figura 33. Precipitación anual en Mendoza de 1983 a 2013.....	72
Figura 34. Precipitaciones mensuales en Mendoza durante 2013 .....	73
Figura 35. Composición de anomalía de precipitación en superficie entre el mes de enero de 2013 y la media climatológica del intervalo de años 1981-2010 .....	74
Figura 36. Promedio de las precipitaciones para (a) primera quincena del mes de enero de 2013 y (b) segunda quincena del mes de enero de 2013.....	75
Figura 37. Promedio de las velocidades (escala de colores) y la dirección del viento (flechas) para el mes de enero de 2013 (a) en superficie, 1000 mb y (b) en altura, 500 mb .....	75
Figura 38. Promedio de la temperatura del aire para el mes de enero de 2013 (a) en superficie, 1000 mb y (b) en altura, 500 mb .....	76
Figura 39. Seguimiento del evento ocurrido entre el 26 y el 30 de enero de 2013 a través de las .....	76
Figura 40. Composición de anomalía de precipitación en superficie para el evento comprendido entre los días 26 y 30 del mes de enero de 2013 y la media climatológica del intervalo de años 1981-2010.....	77
Figura 41. Promedio de las precipitaciones para el evento comprendido entre los días 26 y 30 del mes de enero de 2013 .....	77

Figura 42. Promedio de las velocidades (escala de colores) y la dirección del viento (flechas) para el evento ocurrido entre los días 26 y 30 del mes de enero de 2013 (a) en superficie, 1000 mb y (b) en altura, 500 mb.....	78
Figura 43. Precipitación acumulada (mm) en el período comprendido entre el 26/01/2013 y el 30/01/2013 (a) Escenario sin química, OFF_Q, (b) Escenario con química, ON_Q .....	79
Figura 44. Precipitación acumulada (mm) en el período comprendido entre el 26/01/2013 y el 30/01/2013 para los escenarios con química incrementada (a) con química x 1000, ON_Qx1000ch área pequeña 36x36km, (b) con química x 10000, ON_Qx10000 área grande 100x100km.....	80
Figura 45. Distribución espacial y concentración de PM 2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en el período desde el 26/01/2013 hasta el 30/01/2013 (a) con química ON_Q, (b) con química incrementada ON_Qx10000.....	81
Figura 46. Precipitación acumulada (mm) en el período comprendido entre el 26/01/2013 y el 30/01/2013 para los escenarios con química incrementada (a) con química x 100, ON_Qx100 área 100x100km, (b) con química x 5000, ON_Qx5000 área 100x100km.....	82
Figura 47. Diferencias entre los escenarios de propuesta para el evento ocurrido entre el 26 y el 30 de enero de 2013. (a) Dif. sin química - con química (OFF_Q - ON_Q), (b) Dif. con química - con química incrementada x 1000 (OFF_Q - ON_Qx1000ch), (c) Dif. sin química- con química incrementada x 1000 (OFF_Q - ON_Qx1000ch), (d) Dif- con química incrementada x 1000 - con química incrementada x 10000 (ON_Qx1000ch - ON_Qx10000).....	84
Figura 48. Perfiles verticales de humedad relativa para una latitud 32° y 21UTC para el evento simulado entre el 26 y 30 de enero de 2013 (a) con química ON_Q, (b) con química incrementada en 1000 ON_Qx10000. La línea punteada indica la región con mayores alteraciones identificada .....	85
Figura 49. Diferencias entre los nuevos escenarios para el evento ocurrido entre el 26 y el 30 de enero de 2013. (a) Dif. con química - con química incrementada x 100 (ON_Q - ON_Qx100) (b) Dif. con química - con química incrementada x 5000 (OFF_Q - ON_Qx5000).....	86
Figura 50. Eventos de fuego registrados y sus correspondientes emisiones en kg de PM 2.5 en enero de 2013.....	88
Figura 51. Distribución de sectores definidos para el análisis de la relación entre precipitaciones e incendios de Argentina entre 2007-2017.....	89
Figura 52. Incendios registrados por sector en el período comprendido entre 2007 y 2017 .....	91
Figura 53. Promedio de precipitaciones anuales a partir de datos obtenidos de CHIRPS entre 1981 y 2017 .....	92
Figura 54. Promedio de precipitaciones mensuales a partir de datos obtenidos de CHIRPS entre 1981 y 2017 .....	92
Figura 55. Promedio de precipitaciones anuales para el período 2007-2017 bajo las diferentes cantidades de material particulado PM 2.5 establecidas en las condiciones de análisis.....	93
Figura 56. Promedio de material particulado anual para el período 2007-2017 de acuerdo a las condiciones de análisis. ....	94

Figura 57. Promedios anuales de precipitación (mm) medidos en el eje vertical izquierdo y promedios anuales de PM 2.5 (kg) medidos en el eje vertical derecho para el período 2007-2017 en el punto (35°S, 67.5°O).....	94
Figura 58. Promedio de precipitaciones mensuales para el período 2007-2017 bajo las diferentes cantidades de material particulado PM 2.5 establecidas en las condiciones de análisis.....	95
Figura 59. Promedio de precipitaciones mensuales para el período 2007-2017 bajo las diferentes cantidades de material particulado PM 2.5 en kg establecidas en las condiciones de análisis. ....	96
Figura 60. Trayectorias directas para el evento analizado en esta investigación usando NOAA/ MODELO HYSPLIT .....	97
Figura 61. Retrotrayectorias para el evento analizado en esta investigación usando NOAA/ MODELO HYSPLIT .....	97



## Capítulo I : INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción general de la atmósfera terrestre

La atmósfera terrestre es una capa gaseosa delgada que recubre nuestro planeta, constituye uno de los elementos esenciales para el desarrollo de la vida en la Tierra. La atmósfera es el medio donde se manifiestan el clima y los fenómenos meteorológicos. Tiene muy baja densidad y fácil movilidad. Es fundamental en el equilibrio energético del planeta, debido a que es la que controla la radiación que llega al suelo y la radiación desde la superficie terrestre liberada al espacio.

Está compuesta principalmente por los gases  $N_2$  (78%),  $O_2$  (21%) y Ar (1%), cuyas abundancias son controladas en escalas de tiempo geológicas por la biosfera, absorción y liberación del material de la corteza, y desgasificación del interior. El vapor de agua es el siguiente constituyente más abundante; se encuentra principalmente en la atmósfera inferior y su concentración es muy variable, alcanzando concentraciones tan altas como el 3%. Evaporación y precipitación controlan su cantidad. Los componentes gaseosos restantes, los gases traza, comprenden menos del 1%.

La composición atmosférica no es homogénea, las masas de aire que la forman contienen pequeñas gotas de líquidos y partículas sólidas llamadas aerosoles (Seinfeld & Spyros, 2006).

Aproximadamente el 99% de la masa atmosférica se ubica por debajo de los 30km, es por ello, que su espesor resulta insignificante en comparación al radio terrestre (Brasseur & Solomon, 2005). A pesar de ello, en la atmósfera ocurren numerosos procesos físicos y químicos que la hacen centro de estudio para diversas ciencias.

### 1.2. Nubes y formación de gotas

El agua está presente en la atmósfera en forma gaseosa (vapor de agua), líquida (gotas) y sólida (cristales).

Al igual que muchos otros gases que forman parte de la atmósfera, el vapor de agua es invisible para el ojo humano, sin embargo, las nubes no son otra cosa que la materialización física y visual del vapor de agua atmosférico que, al cambiar de fase y agruparse, forma estructuras que cubren total o parcialmente el cielo.

El vapor de agua producto de la evaporación, asciende por convección y se enfría hasta que condensa nuevamente formando gotas microscópicas, que a su vez, serán el origen de las nubes.

Las nubes desempeñan un papel muy complejo en el sistema climático, son la fuente de precipitación, afectan la cantidad de energía que proviene del Sol y que absorbe la tierra, aíslan la superficie de la Tierra y la atmósfera baja, entre otros. Son un eslabón del ciclo natural del agua en la tierra, generado y movido por el calor del Sol (León & Quirantes, 2004).

Las gotas, son producto del agua que llega a la atmósfera por evaporación de océanos y tierra, y como parte del proceso hidrológico retornan a la superficie de la tierra en forma de precipitación. Las gotas de nube se forman a partir de un proceso conocido como nucleación, en el cual las moléculas de vapor de agua cambian a un estado de

mayor orden. La nucleación puede ser de tipo homogénea, cuando la gota de nube se forma a partir de vapor de agua pura, o heterogénea cuando la colección de moléculas de vapor de agua se produce sobre una sustancia extraña.

La nucleación de tipo homogénea no es un proceso natural, ya que para que pueda darse, la saturación del aire debe rondar el 400%, y esta situación no se da debido a que rara vez el aire supera el 1% de saturación. De este hecho, surge que la nucleación heterogénea es la causante de la formación de la mayoría de las gotas en nubes. En este caso, millones de partículas pequeñas de aerosol dispersas en la atmósfera participan de modo fundamental. El agua forma gota sobre ellas, y en este momento los aerosoles son conocidos como “cloud condensation nuclei”-CCN (Pérez, 2013).

### 1.3. Aerosoles atmosféricos

Una gran variedad de fuentes antropogénicas y naturales introducen en la atmósfera suspensiones relativamente estables de partículas sólidas o líquidas en un gas. Sus diámetros se encuentran en un rango de  $10^{-9}$  –  $10^{-4}$  m. Entre las fuentes antrópicas se considera el transporte, la minería, las actividades industriales, la quema de biomasa, entre otros; mientras que las fuentes naturales son la sal marina, la resuspensión de polvo, los incendios forestales, las erupciones volcánicas, etc.

Hay partículas primarias que se emiten directamente de la fuente y partículas secundarias que están formadas por nucleación y condensación de precursores gaseosos. Las partículas suspendidas en la atmósfera se someten a diferentes interacciones y transformaciones físicas y químicas que generan cambios en su tamaño, su estructura y composición. Dependiendo de las propiedades específicas de cada tipo de aerosol y de las condiciones meteorológicas, los tiempos de residencia de estas partículas en la atmósfera van desde horas hasta semanas.

Tanto la concentración, como la composición y la distribución del tamaño de las partículas atmosféricas de aerosol son muy variables tanto espacial como temporalmente. En general, los principales componentes químicos presentes en el aire son sulfato, nitrato, amonio, sal marina, polvo mineral, compuestos orgánicos, carbono negro y carbono elemental; cada uno de los cuales contribuye sobre el 10-30 % de la carga total.

Todos los aerosoles, provenientes de fuentes antrópicas o naturales, juegan un papel clave en el sistema climático regional y global (Pappalardo et al., 2003)(Deshler, 2008).

#### 1.3.1. Distribución de tamaño de aerosoles

Según la manera en que se forman y eliminan los aerosoles presentes en la atmósfera, éstos tienden a formar diferentes modos de distribución de tamaños, mecanismos de producción y remoción como se ve en la Figura 1.

Los núcleos que se localizan en la atmósfera corresponden principalmente a tres tipos (Falcón, 2010):

a) Ultrafinos: Corresponden a los modos nucleación (radio inferior a  $0,01\ \mu\text{m}$ ) y Aitken (radio entre  $0,01\ \mu\text{m}$  y  $0,1\ \mu\text{m}$ ): Se presentan en concentraciones elevadas y la mayor parte son productos en combustión.

b) Grandes núcleos: Modo acumulación (radio superior a  $0,1\ \mu\text{m}$  e inferior a  $1\ \mu\text{m}$ ). Existen pequeñas concentraciones y en parte, son productos de combustión.

Las fuentes antropogénicas y naturales se correlacionan más con los modos antes expuestos, al igual que sulfatos, carbón elemental, compuestos aromáticos, metales, etc.

c) Núcleos gigantes: Pertenecen al modo grueso (radio superior a  $1\ \mu\text{m}$ ), pero los más grandes pueden llegar a  $10\ \mu\text{m}$ ). La mayoría son de sal marina que proviene de la evaporación; son más numerosos sobre los océanos y sobre las costas, y sobre todo cuando el viento es fuerte. En este caso se considera también el polvo resuspendido, el polen, etc.

La distribución de tamaño de los aerosoles de cada modo está representada a través de una distribución log-normal.

Los aerosoles que entran dentro de la clasificación del modo acumulación pueden permanecer en la tropósfera durante varios días o semanas. Éstos se forman por la coagulación de aerosoles más finos, por conversión química de gases y vapores a partículas. Este modo es removido de manera eficiente por deposición húmeda y seca. En el caso de la deposición húmeda, las partículas son removidas por las precipitaciones, formando gotas dentro de la nube, o también barridas por gotas bajo la nube (Jacobson, 2005).

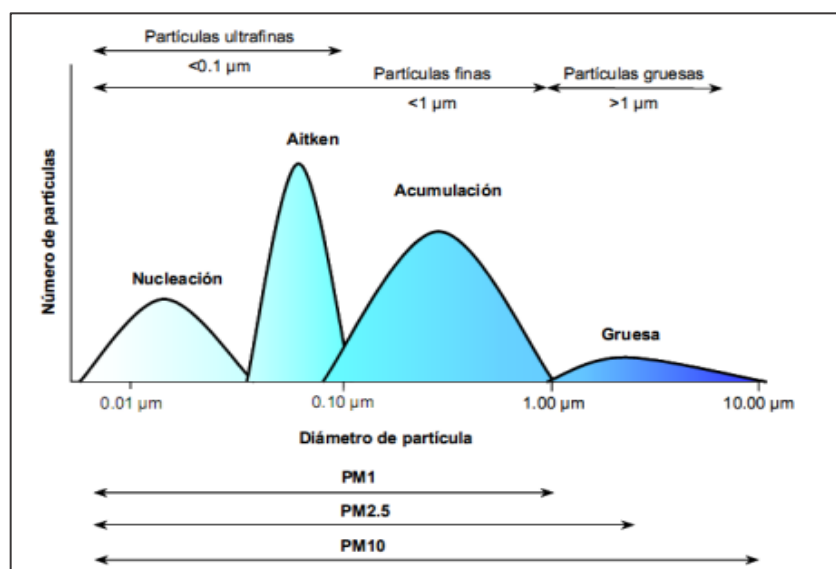


Figura 1. Distribuciones modales de tamaños de partículas

Fuente: (Viana Rodríguez et al., 2003)

La Figura 2 muestra que los aerosoles con tiempos de vida media de minutos a horas, ingresan a la atmósfera en su mayor parte por condensación de vapor caliente (modo nucleación y Aitken). Al transcurrir el tiempo, estos crecen en su mayor parte por

coagulación. Así, el mecanismo de remoción más eficiente de ambos modos es la coagulación browniana y la difusión.

Los aerosoles del modo acumulación pueden existir en la troposfera durante varios días e incluso semanas y se forman parcialmente por la coagulación de los aerosoles más finos y por la conversión química de gases y vapores a partículas de la atmósfera. Este modo es removido eficientemente por deposición seca y húmeda. En el caso de deposición húmeda, las partículas de aerosol pueden ser removidas por la precipitación, ya sea formando gotas o partículas de hielo dentro de la nube.

El modo grueso se genera en forma mecánica y su tiempo de vida media alcanza varias semanas. La mayor parte de estos aerosoles son removidos gravitacionalmente de la atmósfera por sedimentación o deposición seca (Zhang et al., 2001).

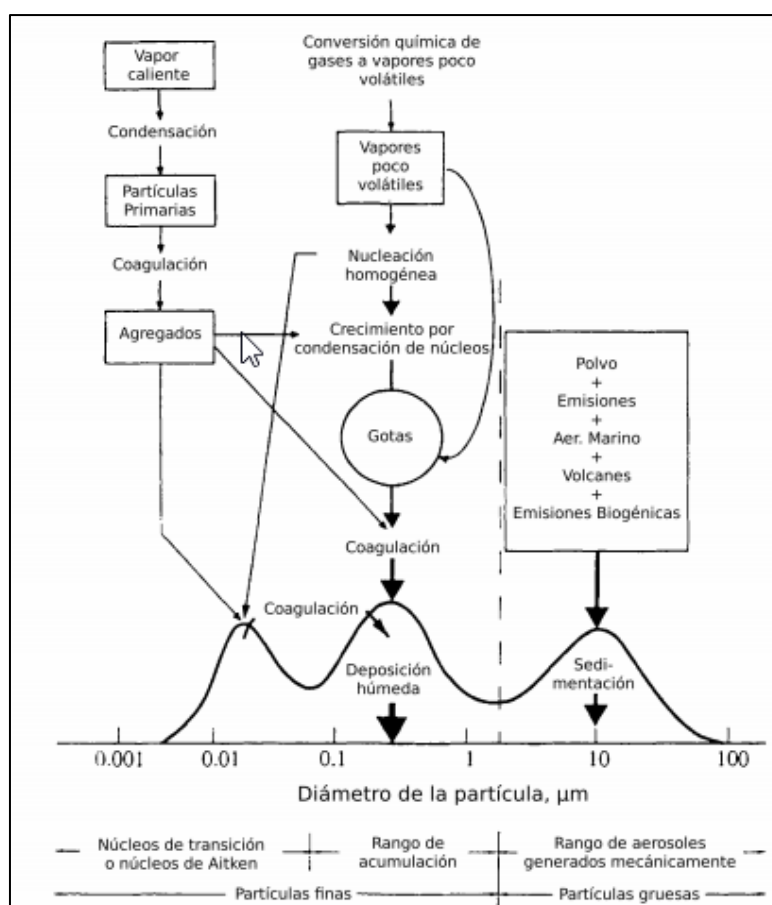


Figura 2. Esquema idealizado de distribución y procesos que afectan los aerosoles atmosféricos  
Fuente: (Seinfeld and Pandis, 2006)

### 1.3.2. Propiedades e impactos en la dinámica atmosférica

La cuantificación y caracterización del impacto de las emisiones antrópicas de aerosoles a la atmósfera posee todavía un alto grado de incertidumbre en lo relativo a la predicción del comportamiento de las variables meteorológicas, y por lo tanto en el clima. Los

aerosoles emitidos desde la superficie terrestre producen una variedad de efectos sobre la atmósfera y la superficie terrestre.

Las suspensiones, conocidas como aerosoles atmosféricos, no solo poseen efectos nocivos para la salud (Pope, 2000) sino que también juegan un papel clave en el sistema climático regional y global (Haywood & Boucher, 2000) (Deshler, 2008).

Las manifestaciones de la presencia de aerosoles en la atmósfera se pueden clasificar en tres grandes grupos: efectos directos, efectos semi-directos, y finalmente efectos indirectos (Ver Figura 3).

Los efectos directos de los aerosoles atmosféricos están vinculados a la radiación solar del sistema acoplado superficie-atmósfera, a través de la redistribución de la radiación solar (longitud de onda corta y las emisiones infrarrojas) debido tanto a la dispersión como a la absorción de las partículas de los aerosoles que generalmente están distribuidas en forma no uniforme en la atmósfera (Ackerman & Chung, 1992) (Charlson et al., 1992) (Kiehl & Briegleb, 1993).

Por otro lado, los aerosoles emitidos desde la superficie terrestre, como el hollín y el polvo mineral, al absorber radiación solar incidente influyen en la variación térmica de la atmósfera local, ocasionando alteraciones en las formaciones nubosas, tanto en los mecanismos de formación, ocurrencia, concentración como en la forma y tamaño de los núcleos de hielo (IN - Ice Nuclei) y núcleos de condensación de nubes (CCN) a través del llamado efecto semi-indirecto (Hansen, 1997).

Los aerosoles afectan la microfísica de las nubes, y por ende desempeñan un rol crucial en las propiedades radiativas de las nubes. A esto se lo conoce como primer efecto indirecto descrito en (Twomey 1974) (Twomey, 1991) y (Jones, 1994) entre otros.

Adicionalmente los aerosoles pueden alterar los patrones de precipitación o el tiempo de vida medio de las nubes afectando a mediano y largo plazo las condiciones climáticas. A este otro efecto se lo conoce como segundo efecto indirecto (Albrecht, 1989) (Pincus & Baker, 1994) (Haywood & Boucher, 2000). A partir de trabajos de (Twomey, 1977) se sabe que especialmente los aerosoles con un diámetro aproximado de  $0,05\ \mu\text{m}$ , proporcionan los núcleos para la formación de gotas en nubes (Martin et al. 1994).

Se ha estudiado asimismo, que los efectos de las emisiones humanas en las precipitaciones dependen tanto del tipo de emisión como del ambiente en donde éstas se originen (Rosenfeld, 2000).

Es probable que en una atmósfera húmeda e inestable los aerosoles provenientes de la contaminación generen nubes que desarrollen fuertes corrientes ascendentes y descendentes, crecimiento a grandes alturas, tormentas y producción de más lluvia. En cambio, en una atmósfera seca y estable los aerosoles de contaminación inducen formación de nubes que desarrollan corrientes de ascenso y descenso más débiles, crecimiento superficial y menos lluvia (Warner, 1968) (Andreae, 2004) (Rosenfeld et al. 2008).

Los aerosoles desempeñan también un efecto importante sobre la química atmosférica afectando la concentración de otros componentes menores, como por ejemplo el ozono. Los aerosoles atmosféricos de acuerdo a sus propiedades y, a diferencia de los gases de efecto invernadero que siempre provocan el calentamiento del planeta por captura de

radiación infrarroja terrestre, pueden causar no sólo el calentamiento sino también el enfriamiento de la atmósfera (Bindoff et al., 2013) (Raju et al., 2015).

A escala regional, los forzamientos radiativos debido a los aerosoles puede exceder a los gases de efecto invernadero y conducir a mecanismos de retroalimentación del clima (Ramanathan et al., 2001) (Forster, 2007).

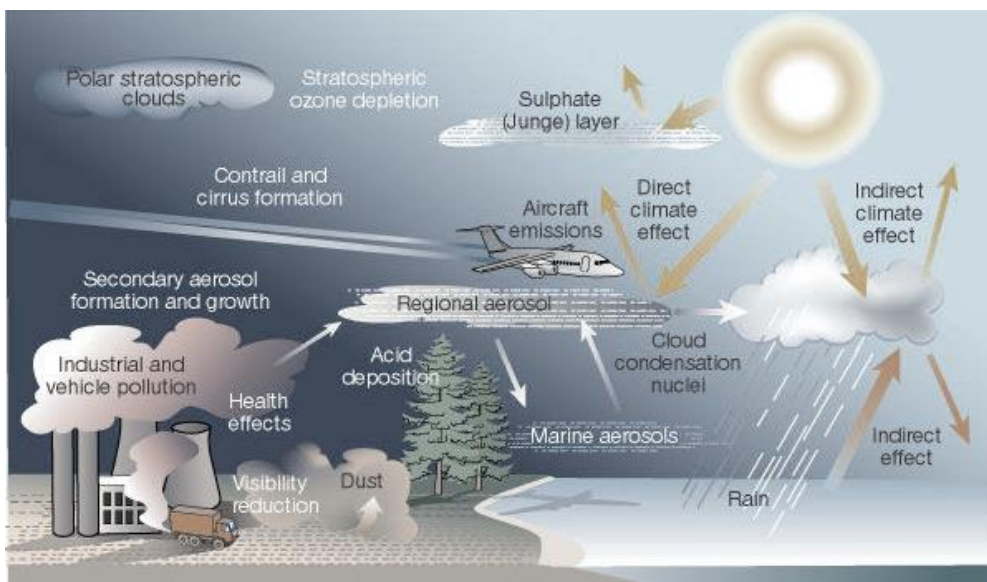


Figura 3. Atmósfera y aerosoles: Panorama general  
Fuente: (Kolb, 2002)

### 1.3.3. Material particulado

Dentro de la infinidad de sustancias que pueden constituir a los aerosoles atmosféricos, el material particulado (PM – Particulate Matter) es señalado por varios estudios como el principal compuesto. El término material particulado engloba una mezcla compleja de partículas que se encuentran en suspensión en el aire y presentan diversas características físicas, diferentes composiciones químicas y muy variadas fuentes de emisión.

Son partículas presentes en la atmósfera provenientes tanto de fuentes naturales, como de las actividades antropogénicas (OMS 2006); siendo sus principales constituyentes los componentes silíceos y carbonáceos.

Varios estudios han probado que las partículas atmosféricas, en especial, las partículas secundarias de origen antrópico, poseen un gran impacto en la salud humana (Kampa & Castanas, 2008) (Stanek et al., 2011). Por varios años, las normas de calidad para partículas en muchos países se basaron en monitoreo de la concentración en masa de Partículas Totales Suspendidas (conocidas por sus siglas en inglés, TSP- Total suspended Particles) (Harrison & Yin, 2000) (Monn et al., 1995). Sin embargo, debido a que una fracción muy relevante de las TSP está constituida por partículas no inhalables y con bajo impacto sobre enfermedades respiratorias y cardíacas, la relación entre efectos sobre la salud y niveles de TSP es mucho menor en comparación con la existente entre los niveles de material particulado con diámetros aerodinámicos menor a 10, 2.5 y 1  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>, respectivamente). Esto motivó, por ejemplo, la aplicación de monitoreo de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en las normas de calidad de los Estados Unidos (U.S. EPA, 1987, 2004).

Posteriormente, la Unión Europea siguió la misma tendencia al remplazar la norma de calidad de aire basada en TSP por PM<sub>10</sub>. Actualmente, en Mendoza de acuerdo con la Ley 5100, por el decreto reglamentario 2404/89 si bien se habla de particulado total, hoy se interpreta ese número para PM<sub>10</sub>.

En la actualidad, existe una clara tendencia para desarrollar estrategias de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> adicionalmente a PM<sub>10</sub> debido a su relación más directa con los efectos sobre la salud (Polichetti et al., 2009) y para evitar interferencias con partículas de origen natural. Por otro lado, emisiones de actividades industriales y algunas emisiones fugitivas poseen un gran impacto en la calidad de aire, con emisiones en el rango de tamaños 2.5-10  $\mu\text{m}$ . En escala global, las emisiones antrópicas de PM no exceden el 10% del total de emisiones de partículas, estando el resto constituido por emisiones naturales primarias (J. Hansen, 2005) (Haywood & Boucher, 2000) (Kiehl et al., 2000).

En América Latina, los casos de estudio son escasos. Como ejemplo, (Franck, 2014) y otros, relevaron que más del 95% de la población urbana de Santiago de Chile está expuesta a concentraciones promedio de 72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub>, valores que se encuentran muy por encima del objetivo. En cuanto al panorama en Argentina, actualmente no se han realizado estudios de exposición poblacional al material particulado, pero se tiene información de datos de mediciones que sugieren que los niveles superarían las concentraciones recomendadas (Allende 2015) (López, 2011).

El impacto a largo plazo de la contaminación ambiental por emisiones de material particulado se sumaría a los efectos del calentamiento global (Ramanathan, 2007) (Bevan et al., 2008) (Rosenfeld et al., 2008) (Lee & Liou, 2012).

#### 1.4. Los Andes

La Cordillera de los Andes es una cadena montañosa que se extiende a través de la zona occidental de América del Sur. Están comprendidos entre los 11° de latitud N y los 55° de latitud S, formando parte de Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela. La cordillera de los Andes tiene una longitud aproximada de 7500 km, y un ancho que va de los 200 a los 700 km de acuerdo a la región. Entre Argentina y Chile, región de estudio, su altura media es de 4000m, con su punto más alto en el Aconcagua a 6961m en Mendoza-Argentina.

##### 1.4.1. Topografía de la región

La Cordillera de Los Andes contiene una muy variada geomorfología, donde se incluyen volcanes, glaciares, valles, entre otras. Esto, junto con una gran diversidad en cuanto a flora y fauna.

En su parte meridional, es la frontera natural entre Argentina y Chile, zona en la que se ubican las montañas más altas del continente.

Esta región está incluida dentro del denominado Anillo de Fuego del Pacífico, que se extiende a lo largo de miles de kilómetros continentales.

A lo largo de e, la actividad sísmica es sumamente elevada y afecta de manera bastante uniforme a toda la región.

En la zona central, Los Andes se ensanchan dando lugar a una meseta conocida como el altiplano, compartido por Argentina, Bolivia, Chile y Perú. Nuevamente, hacia el norte de

Perú y Ecuador se vuelve angosta y se ensancha llegando a Colombia donde se divide en tres ramas, dos hacia el norte y noroeste de Colombia y una a Venezuela donde la cordillera se prolonga hasta casi tocar el mar Caribe.

Según su morfología, la Cordillera de Los Andes puede dividirse en zonas particularmente conocidas:

- Andes australes: Andes Patagónicos y Andes fueguinos, al sur del Golfo de Penas
- Andes centrales: Andes peruanos, bolivianos y argentino-chilenos, entre el Golfo de Guayaquil y el Golfo de Penas.
- Andes septentrionales: Andes venezolanos, colombianos y ecuatorianos, al sur del Golfo de Penas.

#### 1.4.2. Meteorología de la región

La cordillera andina se caracteriza por poseer una gran diversidad meteorológica que depende de múltiples factores, como lo son los vientos dominantes, las corrientes oceánicas y principalmente la disposición del relieve en forma latitudinal, que provoca un efecto Foëhn, lo cual determina que un área de la cordillera reciba enormes cantidades de precipitación, mientras que la otra sufre una notable sequía. Las zonas localizadas a barlovento son las que reciben mayor precipitación, mientras que las situadas a sotavento son mucho más áridas.

Las corrientes marinas dependiendo si son frías o cálidas determinan, también, la mayor o menor humedad de las costas.

Los sistemas meteorológicos pasajeros dentro del flujo de aire provenientes del oeste y la complejidad del terreno definen el clima de la región central.

Varios estudios han demostrado que Los Andes afectan el clima a escala regional mediante bloqueo de flujo e influye en el patrón de viento regional y la precipitación. La temporada de verano en los Andes Centrales, especialmente hacia el sector argentino, experimenta eventos de precipitaciones de mayor abundancia con respecto al resto del año; aquí se encuentra la cuarta provincia más grande de Argentina, Mendoza, una zona de muy baja humedad ambiente (30% en promedio) y escasas precipitaciones (alrededor de los 200 mm anuales) enclavada en el seno de la llamada "Diagonal árida Sudamericana" y el área metropolitana más grande de Chile, Santiago. En la Figura 4 se muestran los climogramas de las dos ciudades de mayor importancia en las laderas de la Cordillera de Los Andes.

Las mayores precipitaciones del lado argentino se dan en el verano austral cuando se producen tormentas convectivas intensas debido a la desestabilización de la troposfera local por el intenso calentamiento de la superficie y el establecimiento de vientos del este que favorecen el transporte del aire húmedo desde el interior del continente (Garreaud et al., 2009).

Es fundamental una caracterización apropiada de la influencia de la precipitación en la región debido al impacto que este tipo de eventos genera. (Gonzalez, 2014) (Araneo, 2008) (Vera, 2009).

De acuerdo con predicciones climáticas, la región de los Andes Centrales se vería grandemente afectada por el cambio climático, el cual provocaría una alteración de las relaciones entre precipitaciones líquidas y sólidas, modificaciones en la distribución



estacional de los derrames de los ríos andinos y adelantamientos en los picos de escorrentía. Debido a los posibles impactos socioeconómicos en la región existe una necesidad de diseñar e implementar estrategias de adaptación para estos cambios previstos. Una predicción acertada requiere una correcta representación de las condiciones atmosféricas, su desarrollo y evolución. La física y dinámica de este tipo de sucesos se llega a comprender a partir de modelos de mesoescala.

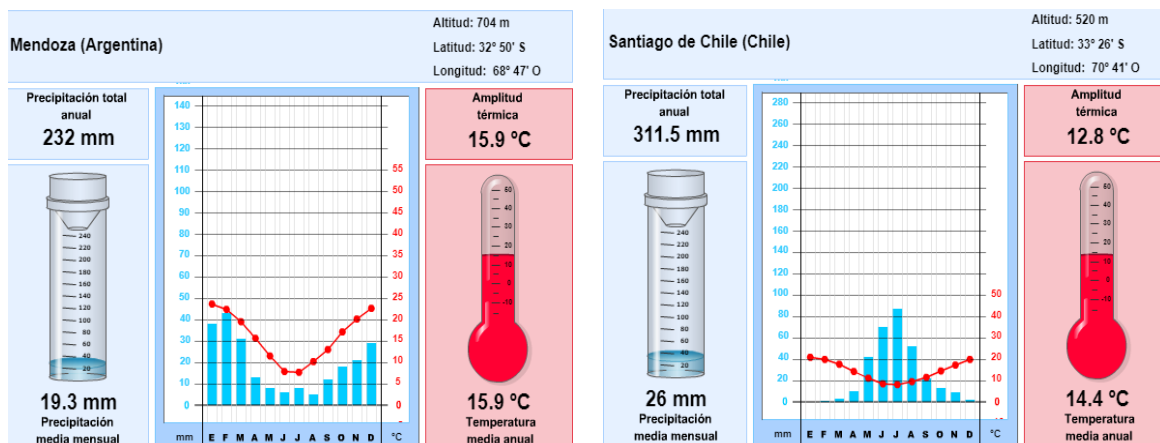


Figura 4. Climograma de las dos ciudades de mayor importancia en las laderas de Los Andes  
Izquierda: Mendoza, ladera este. Derecha: Santiago, ladera oeste.

Fuente: <https://es.climate-data.org>

#### 1.4.3. Calidad del aire en la región

Como en todos los casos, el transporte y la dispersión de los contaminantes dependen en gran medida de factores climáticos y de la dinámica atmosférica.

En zonas montañosas la circulación valle-montaña es un factor de gran importancia. Se pueden observar dos fases, la primera durante el día en donde la radiación solar calienta el aire en las laderas y se genera una corriente ascendente. Así se genera una diferencia de presión que desencadena en una brisa de valle. La segunda fase se da durante la noche y aquí se invierte el fenómeno, el aire frío baja por las laderas y se acumula en el fondo del valle. La capa de inversión, es un fenómeno climático que impide cualquier intercambio entre dos masas de aire, una superior a mayor temperatura y otra inferior que está fría, esto provoca el estancamiento de la contaminación en el valle.

En diferentes partes del mundo, la calidad de aire ha sido estudiada profundamente, pero en la Región de Los Andes Centrales se tienen escasos antecedentes. Resulta de gran interés conocer cómo las actividades humanas pueden impactar en la calidad del aire regional y afectar el clima local. En el Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente (GEAA) se ha desarrollado un sistema de modelos ambientales multiescala, el cual permite evaluar el impacto de los contaminantes provenientes de diversas fuentes sobre la calidad de aire, principalmente en Argentina (Allende, 2011). Debido a que para Sudamérica no existen muchos inventarios regionales completos, el Grupo GEAA ha trabajado en el desarrollo de inventarios de emisiones antropógenicas para todo el país, propios para las áreas de estudio locales, detallando régimen de actividad y tipo de fuente en cada caso. La realización de inventarios propios implica un gran trabajo y supone un importante

aporte al conocimiento de la calidad de aire local, por no contar con muchos antecedentes para los contaminantes estudiados.

### 1.5. Motivación de estudio

Mediciones y estudios numéricos recientes demuestran la existencia de un efecto significativo de las partículas de aerosol sobre la cantidad y la distribución espacial de las precipitaciones (Rosenfeld 1999) (Ramanathan et al., 2001) (Andreae et al., 2004) (Givati & Rosenfeld, 2004) (Jirak & Cotton, 2006) (Lynn, 2005). Pero hay opiniones diversas con respecto a si el impacto generado por estas partículas desemboca en un aumento o reducción de precipitaciones.

Varios estudios han encontrado que la contaminación atmosférica de áreas industriales y urbanas puede suprimir la precipitación (Rosenfeld 2000) (Rosenfeld, 2007) (Borys et al., 2000) (Lee, 2012). Sin embargo existen algunos autores que han encontrado un aumento de las precipitaciones alrededor de áreas urbanas densamente contaminadas tales como Houston (Shepherd & Burian, 2003) y en Tokio (Ohashi & Kida, 2002).

Otros autores, como (Stjern, 2015) indican que en las últimas décadas los aerosoles han aumentado considerablemente en el sudeste de Asia, mientras que en Europa y América del Norte han experimentado enormes reducciones. En Asia la presencia de sulfato y carbono negro se relacionaron con una disminución en la precipitación convectiva, mientras que en Europa y América del Norte se observaron aumentos significativos en las precipitaciones convectivas.

La quema de biomasa es la mayor fuente de aerosoles atmosféricos en América del Sur fuera de las emisiones producidas por las mega-ciudades y eventuales erupciones volcánicas. Algunos estudios de simulación realizados en Brasil indican que el aumento de aerosoles por quema de biomasa reduciría la precipitación regional (Freitas et al., 2005). Estos estudios muestran que los aerosoles también cambian la distribución vertical del flujo de calor latente. Sin embargo, en algunos otros resultados se muestra un efecto positivo, esto es, los aerosoles favorecen un aumento en las precipitaciones, confirmando la controversia aludida (Vendrasco et al., 2009)(Artaxo, 1990)(Artaxo et al., 1994)(Echalar et al., 1998). (Zhang et al., 2011) usando mediciones de aerosoles, CCN e IN con aviones sobre Beijing (China), mostraron que en presencia de un número elevado de partículas se forman un gran número de gotitas de nubes (CD: cloud droplets) pero de tamaño pequeño. En cambio bajo condiciones de bajo número de partículas de aerosoles las CD fueron menores, pero de mayor tamaño. La concentración de los CD depende también del contenido de agua líquida presentes en las nubes.

Esta diferencia o controversia resalta que el tema aún no está completamente establecido y justifica su estudio en esta tesis. Posiblemente esta diferencia esté asociada con las condiciones ambientales distintas de las zonas investigadas en dichos estudios. Según lo demostrado por (Khain et al., 2005), los aerosoles afectan la precipitación en nubes convectivas profundas dependiendo de la estabilidad térmica de la atmósfera, de la humedad del aire, y de la magnitud del viento predominante. Puesto que las zonas urbanas afectan la estabilidad térmica y las concentraciones de los aerosoles, sus efectos sobre la precipitación pueden cambiar de lugar en lugar.

A pesar de las décadas de investigación, se ha demostrado lo difícil y frustrante que ha resultado establecer relaciones significativas entre aerosoles-nubes-precipitaciones. El cambio climático generado por los aerosoles sigue siendo un tema controversial (Stevens & Feingold, 2009).

La motivación de esta tesis nace de la necesidad de conocer cómo los contaminantes de origen antrópico pueden impactar sobre los patrones de precipitación y la dinámica atmosférica, particularmente en Argentina (Mendoza).

Esta tesis es una contribución al campo de modelado de calidad de aire y se concentra principalmente en el desarrollo de un modelo que logre reproducir la meteorología de la región lo más acertado posible, para luego evaluar el impacto local y regional que tiene la contaminación al incluir las emisiones.

## 1.6. Hipótesis

- \* El material particulado, dependiendo de su tamaño y cantidad, podría modificar la composición de las nubes, reduciendo las precipitaciones de lluvia o nieve (Rosenfeld, 2000) (Givati & Rosenfeld, 2004) (Jirak & Cotton, 2006) (Kerminen et al., 2005)(Ramanathan, 2007) (Lee & Liou, 2012) (Bevan et al., 2008).

## 1.7. Objetivos

### 1.7.1.Objetivo General

En base a lo expuesto anteriormente, la motivación y justificación principal de la temática abordada en la presente tesis es:

- \* Evaluar el impacto local y regional de las emisiones de aerosoles urbanos y por quema de biomasa en la calidad del aire y su efecto sobre el comportamiento de las precipitaciones en una zona árida como Mendoza a partir de la optimización de una estrategia de modelado sobre Los Andes Centrales y del análisis de información satelital.

### 1.7.2.Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, se trabajó sobre los objetivos específicos que se detallan a continuación:

- \* Evaluar estadísticamente el comportamiento de las precipitaciones de lluvia y nieve en los últimos años
- \* Identificar las condiciones atmosféricas típicas de zonas montañosas
- \* Evaluar el desempeño de diferentes parametrizaciones para optimizar el modelado meteorológico en la región de estudio

- \* Demostrar la capacidad de modelación con inclusión de emisiones locales usando el modelo de predicción numérica Weather Research and Forecasting with Chemistry WRF-Chem (Grell et al., 2005)
- \* Analizar las interacciones entre aerosoles y nubes para la formación o no de gotas de lluvia a través de modelado de casos de estudio típicos de base

## 1.8. Metodología de trabajo

La Metodología de trabajo implementada en este trabajo consta de dos partes.

Por un lado la incorporación de emisiones antropogénicas en el modelo on-line WRF-Chem (meteorología, transporte y dispersión de especies emitidas resueltas simultáneamente sobre la grilla computacional) a través de una herramienta modificada para conseguir la representación espacio-temporal adecuada sobre Argentina. Junto con ello, la posterior examinación de escenarios en condiciones limpias (sin aerosoles) y condiciones contaminadas (con inclusión de aerosoles) para eventos típicos de precipitación. Y por el otro lado, la comprobación independiente de la influencia de PM sobre los patrones de precipitación, mediante el uso de datos satelitales con suficiente longitud validada disponibles para la Argentina.

## 1.9. Alcances y aportes de la tesis

En términos generales, la presente tesis presenta una serie de contribuciones al campo del modelado de calidad del aire, y en particular, en el modelado de precipitaciones y la influencia que tienen los contaminantes sobre éstas.

- \* Conocimiento de la calidad de aire en Los Andes Centrales, Argentina. Es un área de gran importancia por tratarse de una región semi-árida con alta densidad poblacional y gran actividad agrícola en donde se debe prestar fundamental atención sobre los recursos hídricos existentes
- \* Metodología para generación y/o ampliación de inventarios de emisiones dentro del grupo GEAA
- \* Metodología de trabajo con WRF-Chem: Descripción de parametrizaciones adecuadas y métodos para la generación de condiciones iniciales y de borde. El procedimiento propuesto puede ser extendido a otras regiones de características similares
- \* Se trata del primer estudio centrado en la relación aerosoles-precipitaciones en Los Andes Centrales

## Capítulo II : MODELOS NUMÉRICOS

### 2.1. Modelos numéricos aplicados para estudios de calidad de aire

Debido a que los procesos que caracterizan a la dinámica fisicoquímica del transporte, el intercambio y transformación en la atmósfera de las emisiones naturales o producidas por el hombre son extremadamente complejos, es mandatorio el uso de modelos de calidad de aire (MCA) que incluyan en su formulación estos fenómenos, en las diversas escalas temporales y espaciales en las que se presentan.

Estos MCA son muy importantes en el control y gestión de la calidad del aire, ya que normalmente, son utilizados para determinar el impacto de las diversas fuentes sobre la calidad del aire, tanto concentraciones, como niveles deposición y visibilidad; evaluar el efectivo cumplimiento a las normas ambientales de estrategias de reducción y control de emisiones; y predecir eventos de contaminación que pudieran afectar la salud pública. La correcta implementación de estos modelos permite identificar la contribución de las distintas fuentes y evaluar los efectos provocados por los contaminantes emitidos por cada fuente y su impacto individual sobre los distintos receptores en estudio.

Los modelos de fenómenos naturales suelen ser síntesis del entendimiento científico de sistemas complejos. Son una posibilidad de poner a prueba distintas hipótesis acerca de las interrelaciones entre las componentes de un sistema. Otra área de aplicación es el estudio de posibles escenarios. El grado de complejidad de los modelos sigue una proporción con la complejidad del sistema natural que se pretende modelar (Gallardo Klenner, 1997). En este sentido, la atmósfera es un sistema dinámico altamente complejo, para el cual la modelación numérica es una herramienta que se vuelve indispensable a la hora de evaluar y ponderar procesos, desde escala urbana hasta escala global.

Numéricamente, los MCA siguen sus esquemas en el principio de aplicar un conjunto de ecuaciones a cada fenómeno que experimentan los contaminantes, y sumar las contribuciones de todos los procesos en un balance para cada propiedad considerada.

El balance aplicable de forma general es (1):

$$\frac{\delta c_i}{\delta t} + \frac{\delta(u_j c_i)}{\delta x_j} = D_i \frac{\delta^2}{\delta x_j \delta x_j} + R_i(c_1, \dots, c_n, T) + S(x, t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Del lado izquierdo de la ecuación, el primer término representa la variación de concentración del contaminante  $i$  respecto al tiempo. El segundo, la entrada neta de contaminante asociada al flujo atmosférico (advección y turbulencia) en cada punto  $j$  del área geográfica.

A la derecha de la igualdad, el primer término es la variación de concentración del contaminante por difusión molecular, el segundo la velocidad de aparición o desaparición del contaminante por reacción química y el tercero es la aparición de contaminante en el entorno tenido en cuenta, proveniente de focos emisores en el propio entorno.

La resolución analítica de estas ecuaciones no es posible, puesto que no se conoce la forma de  $(u_j c_i)$  ni la difusión turbulenta asociada. Además, es necesario resolver las  $N$

ecuaciones diferenciales de manera simultánea para poder tener en cuenta la influencia de la concentración de un contaminante  $c_i$  en la velocidad de reacción  $R_i$  de los otros contaminantes y, por tanto, en su balance.

Existen dos aproximaciones matemáticas generales a la resolución de este problema, el enfoque euleriano y el enfoque lagrangiano.

Uno de los modelos eulerianos de última generación es el modelo Weather Research and Forecasting-model coupled with Chemistry (WRF-Chem), que se utiliza en este trabajo para pronóstico e investigación.

Un MCA es euleriano cuando el comportamiento de las especies es descripto de manera relativa a un sistema fijo de coordenadas y en la ecuación de continuidad están contenidos explícitamente los términos que describen el efecto de advección de masa desde y hacia un punto fijo.

Así, la ecuación de continuidad por la vía euleriana se expresa como (2):

$$\frac{\delta c}{\delta t} = -\nabla \cdot (cv) + Q - S \quad (2)$$

Donde:

$\frac{\delta c}{\delta t}$  : Variación local de la concentración de una especie en el tiempo

$c$  : Concentración [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$v$ : Vector velocidad [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$Q$ : Fuentes [ $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ ]

$S$ : Sumideros [ $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ ]

$\nabla$ : Variación respecto del espacio, en tres direcciones independientes

Esta expresión, sin embargo, no es aplicable en la práctica ya que los modelos numéricos y los instrumentos de medición no resuelven todas las escalas. Por eso, las cantidades se expresan como la suma de las cantidades promedio (resueltas) y las desviaciones de ese promedio (no resueltas), en lo que se llama partición de Reynolds. Entonces la ecuación (2) puede escribirse en la forma de la ecuación (3):

$$\frac{\delta c}{\delta t} = -c\nabla \cdot v - v\nabla \cdot c - \nabla \cdot (\langle c'v' \rangle) + Q - S \quad (3)$$

$-v\nabla \cdot c$ : Advección de masa por efecto del viento promedio

$-\nabla \cdot (\langle c'v' \rangle)$ : Divergencia del flujo turbulento del compuesto,  $\langle \rangle$  significa promedio y fluctuaciones en torno al promedio

Los modelos de tipo euleriano son de la clase más sofisticada dentro de los MCA. En éstos la zona de modelado puede ser dividida en celdas, de manera horizontal o vertical. La concentración de contaminantes en cada celda es estimada a intervalos específicos de tiempo y se toma en cuenta la información meteorológica tridimensional, las concentraciones iniciales de contaminantes, las emisiones, el transporte, la dilución y las

transformaciones químicas. Generalmente, estos modelos son aplicados para llevar a cabo evaluaciones detalladas a nivel urbano o regional, cuando se cuenta con información detallada.

Los modelos lagrangianos hacen uso de un sistema de referencia que se ajusta al movimiento atmosférico. Las emisiones, reacciones, deposición y mezclado de los contaminantes se analizan para un volumen de aire que va cambiando su posición de acuerdo con la velocidad y la dirección del viento, y no para una región entera como los eulerianos. Bajo este esquema general, los modelos lagrangianos se pueden clasificar como modelos de trayectoria y modelos gaussianos, de acuerdo con la geometría del sistema de modelación.

Generalmente estos modelos se aplican para evaluar la dispersión de contaminantes provenientes de fuentes puntuales, aunque en ocasiones también se aplican para simular emisiones de fuentes de área y de línea. Otra característica de este tipo de modelos es que normalmente son aplicados para evaluar la dispersión de contaminantes primarios no reactivos, aunque existen versiones que incluyen en su formulación consideraciones especiales para poder simular procesos de deposición y transformación.

En forma genérica, los MCA se basan en cinco fuentes primarias que se desarrollarán puntualmente en las secciones siguientes. La precisión de estas fuentes determina la incertidumbre de los MCA.

- a. *Datos meteorológicos*
- b. *Datos de emisión*
- c. *Topografía*
- d. *Uso del suelo*
- e. *Mecanismos de reacción y sus parametrizaciones*

El muestreo y análisis de diferentes contaminantes puede aportar información relevante respecto a la calidad de aire local, sin embargo, por sí sola, posee ciertas limitaciones respecto a la baja resolución tanto espacial como temporal. Existen aspectos relacionados con la representatividad de las mediciones que pueden llevarse a cabo, que se deben tener en cuenta para asegurar la validez de los datos obtenidos y las conclusiones desprendidas de éstos. Este tipo de modelos permiten establecer una relación entre las actividades antrópicas que producen las emisiones, la dinámica atmosférica, las características geográficas y la distribución de los contaminantes en el ambiente. Además, posibilitan la estimación del impacto de distintas fuentes de contaminantes atmosféricos sobre la calidad de aire en una determinada región, y en función de ello la definición de políticas que conduzcan a mitigar dicho efecto (Cremades, 2017).

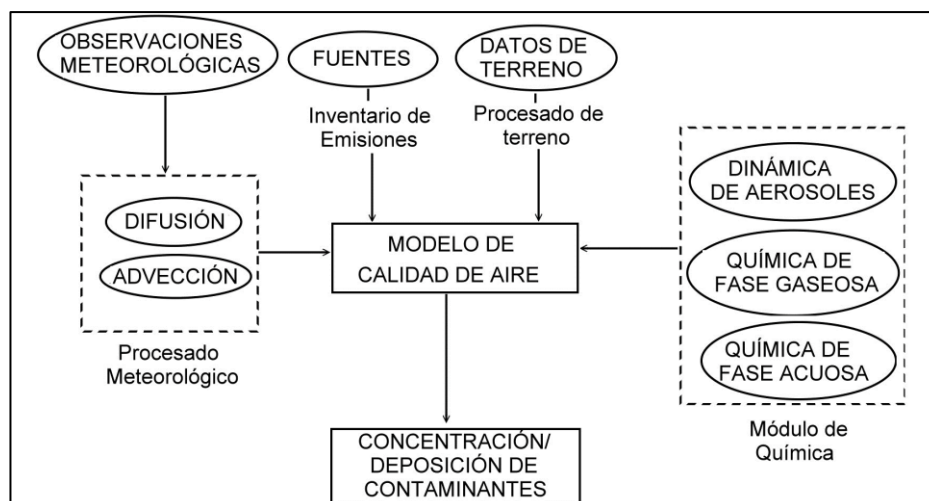


Figura 5. Esquema conceptual de los modelos de calidad de aire  
Fuente: (Puliafito et al., 2011)

### 2.1.1. Modelo meteorológico: Weather Research and Forecasting (WRF)

El modelo dinámico WRF (Skamarock, 2008)(<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>), sucesor del modelo MM5 es un sistema de predicción numérico de mesoscala de nueva generación, diseñado para servir previsiones operacionales y necesidades de estudio de la atmósfera. Posee distintas opciones de parametrizaciones físicas necesarias para un gran espectro de aplicaciones, consistente en microfísica, parametrización de cúmulos, capa límite planetaria (PBL), procesos de superficie y radiación de onda corta y onda larga.

Los datos geográficos y meteorológicos son pre-procesados con WPS, que es el paquete encargado de convertir los datos de gran escala a un formato apropiado para ser empleado por el modelo.

El ARW (Advanced Research WRF) es un componente del sistema de modelado, compuesto por programas de inicialización y de integración numérica que permiten llevar a cabo simulaciones idealizadas y/o de casos reales.

Para el posprocesamiento, la información contenida en los archivos de salida estándares pueden ser visualizados con diferentes herramientas gráficas, como por ejemplo NCAR Graphics NCL.

#### 2.1.1.1. Modelo meteorológico acoplado con química: WRF-Chem

WRF-Chem es el modelo de investigación y pronóstico WRF, junto con la química. El modelo simula la emisión, el transporte, la mezcla y transformación química de gases traza y aerosoles en simultaneidad con la meteorología. Este es un modelo on-line empleado en numerosos estudios, que posee una estructura modular que permite considerar una variedad de proceso físicos y químicos acoplados (Grell et al., 2005). El transporte y la meteorología se resuelven a partir del principio de conservación de la masa y de las reacciones químicas y fotoquímicas en una misma grilla computacional.

Para el tratamiento de aerosoles, WRF tiene para incorporar tres esquemas diferentes:

- MADE (*Model Aerosol Dynamics Model for Europe*) (Ackermann et al., 1998)



- MOSAIC (*Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry*) (Zaveri, 2008)
- GOCART (*Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport*) (Chin, 2000)

La fase gaseosa también es implementada por WRF con varios mecanismos químicos:

- RADM2 (*Regional Acid Deposition Model*) (Stockwell, Middleton, Chang, & Tang, 1990)
- MOZART (*Model for Ozone and Related Chemical Tracers*) (Emmons et al., 2010)
- RACM (*Regional Atmospheric Chemistry Mechanism*) (Goliff et al. 2013)
- CB-4 y CBM-Z (*Carbon Bond Model*) (Zaveri, 1999)
- KPP (*Kinetic Pre-Processor*) (Peckham, 2014): Posibilidad de ampliar mecanismos existentes o generar uno propio.

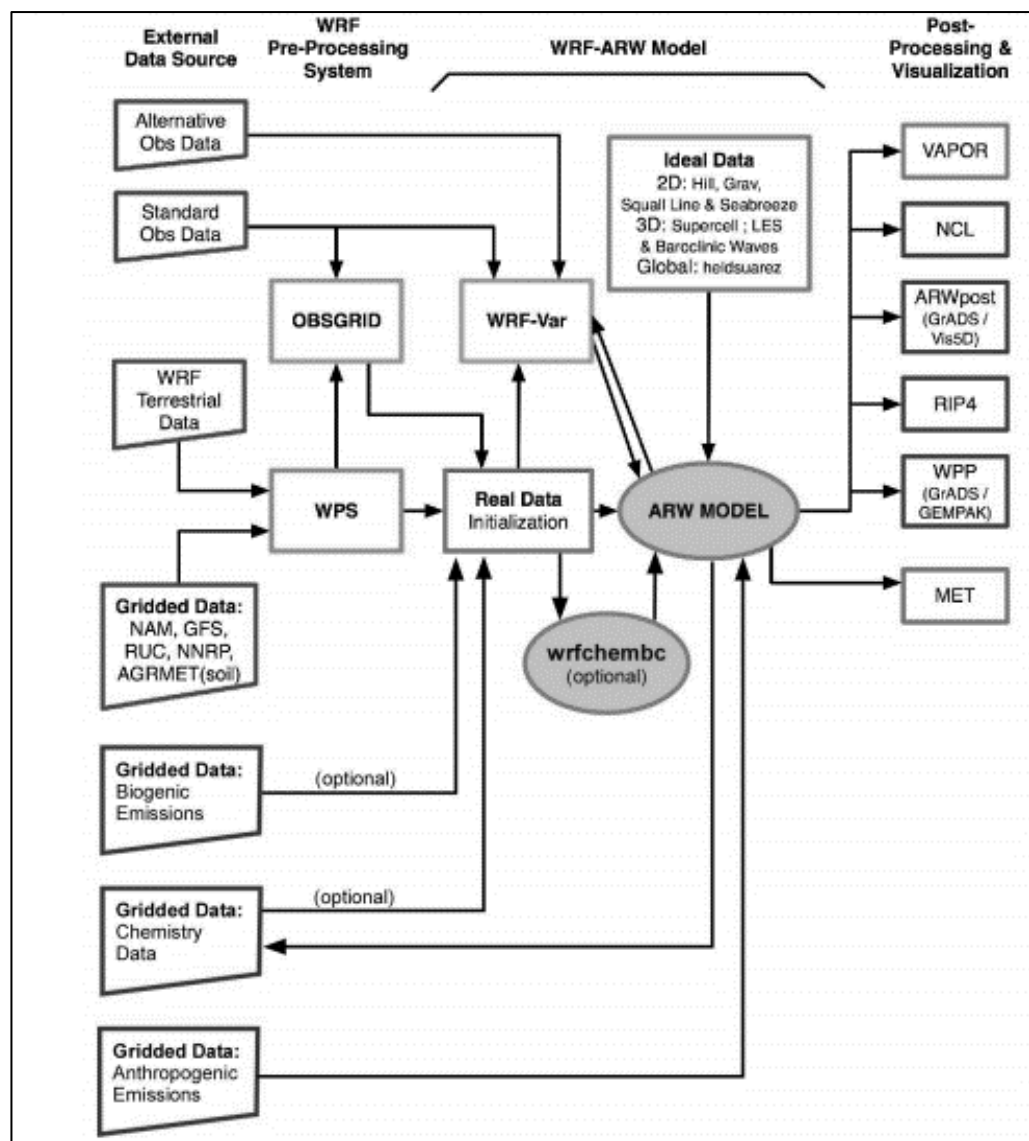


Figura 6. Diagrama de flujo del sistema de modelado WRF  
Fuente: WRF-Chem users guide (Peckham et al., 2012)

## 2.2. Dominios de simulación. Anidado

En WRF / WRF-Chem, existen varias formas de trabajar con anidado. El procedimiento que se conoce como anidado es la manera que tiene el modelo para resolver múltiples dominios uno dentro del otro y lograr ir aumentando de manera gradual la resolución de las grillas empleadas.

Una de las formas es emplear la *línea de una vía*, donde el modelo logra resolver de manera simultánea todos los dominios. El dominio exterior provee las condiciones iniciales y de contorno a los dominios interiores.

Otra de las formas es trabajar en *línea de dos vías*. En este caso existe realimentación entre los dominios interiores y exteriores. Una vez que está resuelta la resolución de los dominios más finos, el dominio externo utiliza estos resultados para actualizar la resolución gruesa.

Por último, se puede trabajar *fuera de línea*, en donde cada dominio es resuelto de manera individual. Primero se resuelve el dominio de resolución más gruesa, y esos resultados serán las condiciones iniciales y de borde para el dominio que sigue y así hasta completar hasta el dominio de menor resolución trabajado.

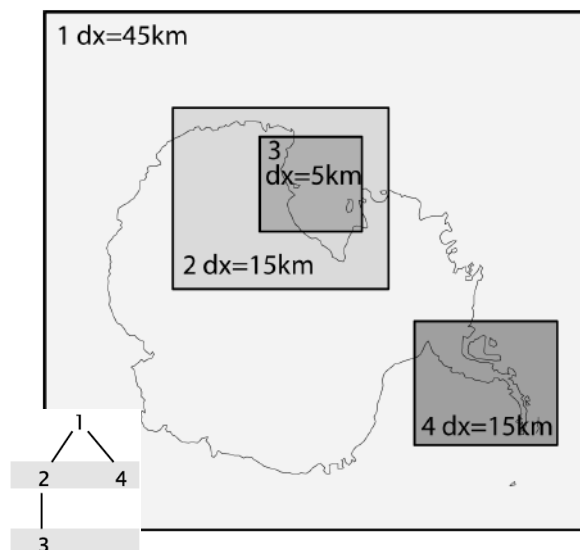


Figura 7. Dominios anidados y sus interdependencias en WRF-Chem

Fuente: WRF-Chem users guide (Peckham et al., 2012)

## 2.3. Resoluciones espaciales y temporales

Para poder resolver las ecuaciones diferenciales, el modelo necesita un conjunto de opciones para el núcleo ARW.

### 2.3.1. Resolución espacial

Dentro de la discretización espacial es necesario definir el espacio horizontal y el espacio vertical.

### 2.3.1.1. Resolución horizontal

La discretización espacial de las coordenadas  $x$  e  $y$  para el núcleo ARW se realiza empleando una malla desplazada como se muestra en la Figura 8.

Las variables vectoriales, componente  $U$  del viento se encuentra en el centro de los bordes laterales; mientras que las componentes  $V$  y  $W$  del viento están en el centro de los bordes horizontales.

Las variables escalares:  $\theta$ ,  $p$ , densidad del aire  $\rho$  y las relacionadas con la humedad  $q$ , se encuentran en el centro de la malla conocido como centro de masa.

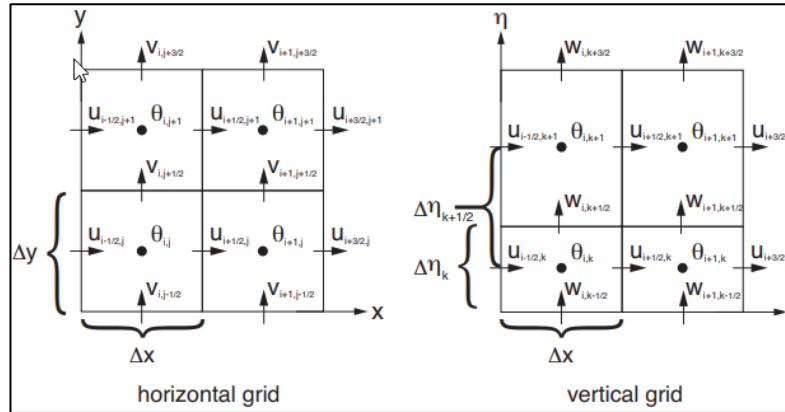


Figura 8. Mallas horizontal y vertical del núcleo ARW  
Fuente: (Skamarock, 2008)

### 2.3.1.2. Resolución vertical

El modelo WRF emplea  $\eta$  para representar lo que en el plano se conoce como coordenada  $z$ . Ésta es una variable, función de la presión hidrostática de la atmósfera en el punto tope de la misma y en la superficie.  $\eta$  varía entre 0 y 1, siendo  $\eta=0$  la frontera superior del dominio de modelado y  $\eta=1$  la superficie. La mayor densidad de niveles está en la superficie de acuerdo al terreno y la menor densidad de niveles se encuentra en atmósfera superior, valores constantes.

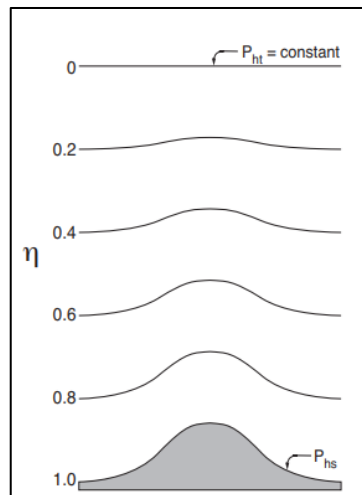


Figura 9. Coordenada  $\eta$  del núcleo ARW para WRF  
Fuente: (Skamarock, 2008)

### 2.3.2. Resolución temporal

El núcleo ARW usa un esquema de integración dividido en el tiempo. En términos generales, significa que los modos de baja frecuencia (modos meteorológicamente significativos) se integran con el paso del tiempo  $\Delta t$  utilizando el método Runge-Kutta de tercer orden (RK3), mientras que los modos acústicos de alta frecuencia se integran en un tiempo menor para mantener la estabilidad numérica. (Skamarock, 2008).

El paso del tiempo  $\Delta t$ , en la baja frecuencia se determina como (4):

$$\Delta t = 6 \Delta x \quad (4)$$

Siendo  $\Delta t$  la resolución temporal en s y  $\Delta x$  la resolución espacial horizontal de los dominios en km.

El paso de tiempo en alta frecuencia (5),  $\Delta \tau$  o tiempo acústico debe ser:

$$\Delta \tau = \frac{1}{4} \text{ o } \frac{1}{3} \text{ de } \Delta t \quad (5)$$

## 2.4. Dinámica

El método RK3 empleado para cálculo de los modos de baja frecuencia en WRF con un tiempo  $\Delta t$  es eficiente, no es definido positivo y no es monótonico. Esto es considerado un problema para las especies químicas y aerosoles que no pueden resultar valores negativos, por lo que se verán obligadas a ser cero, añadiendo masa al sistema.

La advección es la descripción del transporte de las propiedades de una masa de aire de acuerdo al campo de velocidades de la atmósfera.

La advección vertical se configura con orden 3 y la advección horizontal con orden 5.

Estos esquemas, al ser de orden impar, son de tipo difusivos para controlar el crecimiento energético que surge por inestabilidad no lineal, sin necesidad de tener que incluir de forma explícita la difusión en las ecuaciones desarrolladas por el modelo.

En cuanto a la turbulencia, mezclado y coeficiente de difusión de Eddy horizontal, fueron establecidas con la difusión simple. La difusión vertical se determinó de acuerdo al esquema de la capa límite planetaria (PBL).

Para evitar que el modelo se desestabilice localmente con presencia de altos valores de velocidades verticales, los movimientos verticales también fueron amortiguados.

## 2.5. Bases estáticas

Bases de datos sólo de lectura, empleadas para el almacenamiento de datos históricos que servirán para estudiar el comportamiento de datos a través del tiempo, pudiendo llevar a cabo proyecciones.

### 2.5.1. Topografía

Tanto los fenómenos meteorológicos y su variabilidad, como la interacción superficie terrestre – atmósfera (a través de la PBL) gobiernan el flujo de aire sobre la superficie.

En las regiones con topografía compleja, el flujo cerca de la superficie se desacopla del flujo sinóptico, forzado por efectos cinemáticos del terreno, la capa de inversión, inestabilidades dinámicas y algunas actividades de origen antrópico.

A fin de reducir imprecisiones y lograr reproducir las distribuciones temporales y espaciales de la velocidad y dirección del viento, los modelos numéricos intentan capturar los flujos de escala sinóptica y los procesos de desacople. Es por ello que requieren información topográfica dentro de la grilla de modelado.

#### 2.5.2. Uso y cobertura del suelo (Land Use Land Cover – LULC)

Dado que el estado de la superficie, es decir su temperatura y humedad, condicionan los flujos de calor y humedad en la capa límite, la información del estado y uso del suelo es de suma importancia para implementar con precisión los modelos de meteorología y calidad del aire. Es por ello que es necesario incorporar mapas de uso y cobertura del suelo (LULC) en la modelación (Anderson et al., 1976).

Por defecto, WRF tiene dos sistemas de clasificación MODIS-based, con 20 categorías, y Geological Survey (USGS) con 24 categorías de uso de suelo.

Parámetros de entrada que indiquen ciertas propiedades, tales como fracción verde de vegetación, rugosidad, resistencia estomatal, entre otros, son requeridos tanto por el modelo dinámico como por las parametrizaciones de superficie. En WRF, las condiciones de suelo se representan en cada punto de grilla como un número entero que representa la categoría correspondiente a dicha celda.

### 2.6. Bases dinámicas

Las bases de datos dinámicas guardan información que es modificada a través del tiempo. Esto permite ir actualizando, borrando y editando datos de acuerdo a las tareas llevadas a cabo.

#### 2.6.1. Meteorología

Un sistema numérico de predicción meteorológica utiliza datos meteorológicos actualizados para alimentar modelos complejos físico-matemáticos de la atmósfera con el objeto de predecir la evolución de distintas variables meteorológicas

La meteorología otorga a los modelos las variables necesarias para simular proceso de transporte y remoción de especies en la atmósfera. Generalmente, los principales parámetros tenidos en cuenta son: dirección y velocidad del viento, temperatura, presiones, altura de la capa límite, entre otros.

Estas condiciones son tomadas de productos de asimilación de datos de estaciones meteorológicas y productos satelitales de monitoreo constante.

La conveniencia del uso de modelos meteorológicos, radica en que estos logran generar productos con resolución espacial y temporal más detallados.

### 2.7. Parametrizaciones físicas

Los esquemas de parametrización son importantes porque influyen fuertemente en los pronósticos de los modelos e interactúan entre sí de forma indirecta a través de sus cambios. Estos esquemas se relacionan dentro de los procesos con las variables conocidas

por el modelo o variables de estado. Todos aquellos fenómenos atmosféricos que no son resueltos por WRF, pero que son claves para reproducir la estructura y la evolución de la atmósfera son resueltos a partir de estos módulos.

En la mayoría de los casos, las parametrizaciones se centran en los efectos de los procesos físicos de subgrilla dentro de una columna vertical de cada celda de cuadrícula individual, de modo que sólo modifican la transferencia de energía o materia verticalmente.

Existen tipos de parametrizaciones que son llamadas por el modelo en todos los pasos de integración, y otros en forma menos frecuente. El usuario puede definir la frecuencia con la que éstas serán ejecutadas, para lo cual se debe comprender lo mejor posible aquel tipo de fenómeno que va a ser representado.

A continuación se describen las parametrizaciones más importantes que son empleadas en el modelo WRF. La elección de un esquema u otro está sujeta a múltiples factores.

En el marco de esta tesis doctoral se probaron diversas parametrizaciones y combinaciones de ellas hasta lograr obtener la configuración que mejor representa las condiciones dentro de la región estudiada. Tales combinaciones se detallan en la Sección 3.2. “Configuración del modelo”.

#### 2.7.1. Parametrización de superficie

A través de la parametrización de superficie se introducen al modelo las interacciones entre suelo, vegetación y atmósfera. Con esta parametrización se logran cerrar los balances de energía y humedad en la superficie.

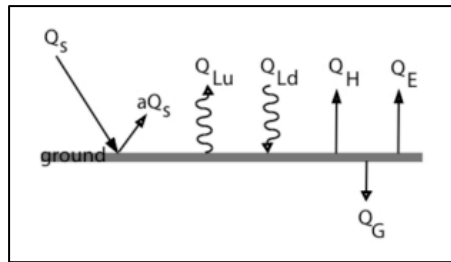
Todos los procesos que ocurren en la superficie terrestre influyen de manera directa sobre la circulación a escala local y global. Existen modelos de superficie cada vez más sofisticados para acoplar ambas escalas (Ver por ejemplo Figura 11).

En WRF, el esquema de superficie requiere condiciones iniciales y de contorno, por ello se emplea la información del modelo atmosférico, forzantes de precipitaciones de la microfísica, forzantes de radiación y del esquema de convección, y provee información sobre el flujo de calor y humedad para cada punto de la grilla. Este esquema no provee tendencias, pero sí genera modificaciones en las variables: humedad y temperatura del suelo y cobertura de nieve.

La radiación solar llega a la superficie terrestre y parte de esa energía es reflejada nuevamente al espacio, otra parte es absorbida por la tierra (dando como resultado el calentamiento de la superficie). La radiación de onda larga emitida por la atmósfera también genera calentamiento de la superficie.

Un modelo de superficie terrestre debe proporcionar diversas cantidades al modelo atmosférico.

El balance de energía terrestre (6) consta de diferentes términos a saber:



$$Q_S - Q_{Lu} + Q_{Ld} = Q_H + Q_E + Q_G \quad (6)$$

Figura 10. Balance radiativo

Fuente: (David J. Stensrud 2007)

- $Q_S$ : Radiación solar que llega a la superficie
- $Q_H$ : Flujo de calor sensible a la superficie
- $Q_E$ : Flujo de calor latente superficial
- $Q_{Lu}$ : Radiación de onda larga emitida por la superficie
- $Q_{Ld}$ : Radiación de onda larga emitida por la atmósfera
- $aQ_S$ : Albedo (puede estar presente o no, dependiendo si se trata de una superficie névea)
- $Q_G$ : Flujo de calor de la tierra

WRF no simula las interacciones existentes entre océano y atmósfera, pero en el esquema de superficie se puede tener en cuenta el efecto de la temperatura de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés: Sea Surface Temperature) para el cálculo del flujo de calor.

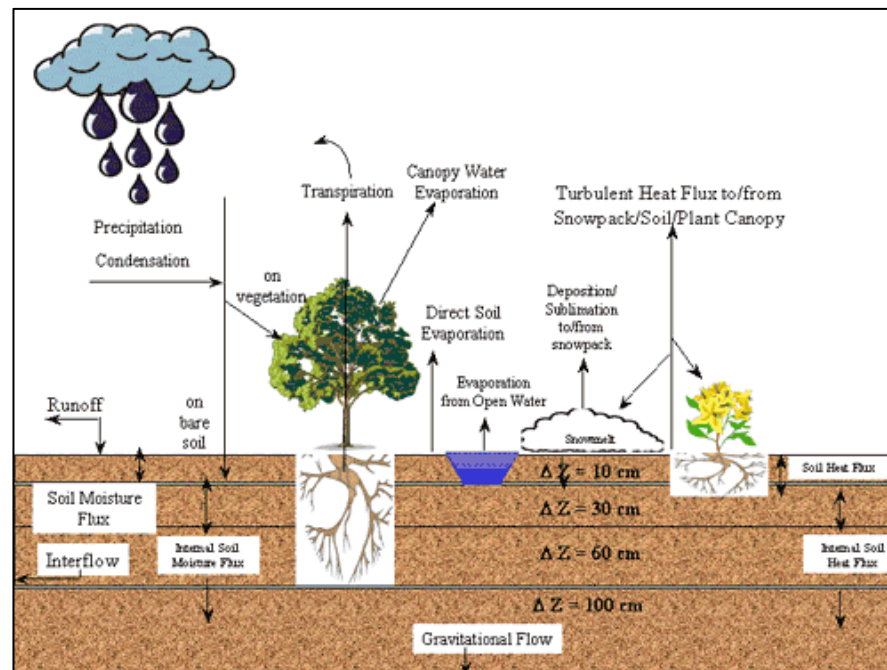


Figura 11. Noah LSM para WRF

Fuente: (Pan and Mahrt 1987, Chen et al. 1996, Chen and Dudhia 2001, Ek et al., 2003)

### 2.7.2. Parametrización de capa límite planetaria (PBL)

La superficie de la tierra ejerce influencia sobre una parte de la tropósfera. La capa límite planetaria es esa parte de la tropósfera que se encuentra influenciada por el sustrato geográfico, y su altura es un parámetro fundamental en el estudio de la calidad del aire. Los principales procesos que se desarrollan en la PBL se muestran en la Figura 12. Esta capa, logra determinar el volumen que existe disponible para que los contaminantes se dispersen y determina las concentraciones que el modelo emite. La función de esta parametrización es calcular los flujos turbulentos que se dan dentro de la capa.

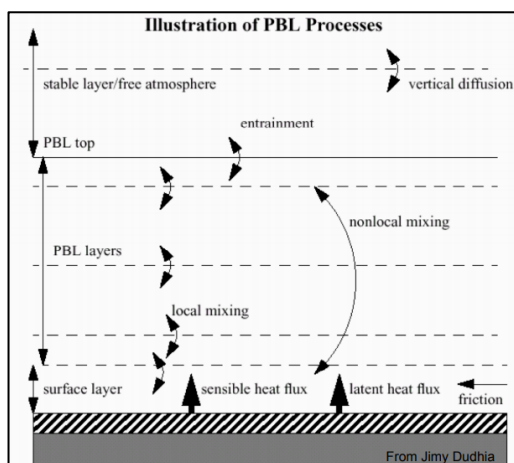


Figura 12. Procesos de la capa límite planetaria  
Fuente: (Jimmy Dudhia)

### 2.7.3. Parametrización de microfísica de nubes

La microfísica de nubes es un proceso de gran importancia debido a que representa la interacción existente entre las nubes y las precipitaciones. A partir del proceso de la microfísica atmosférica se debe lograr la modelación de los cambios de fase del agua, la influencia que ejercen los diferentes aerosoles sobre estos cambios y cómo es que se forma la precipitación a partir de esto. La microfísica es la que explica las condiciones críticas para la formación de gotitas nubosas, su crecimiento, proceso de nucleación, estabilidad nubosa y niveles de mezcla y saturación.

### 2.7.4. Parametrización de cúmulos o convección

La convección es un fenómeno de subgrilla que no puede ser resuelto explícitamente por un modelo atmosférico. Por lo tanto debe ser parametrizado.

Los esquemas de convección juegan un papel fundamental en el ciclo hidrológico y en la regulación de la concentración de vapor de agua en la atmósfera. A través de éste, el modelo tiene en cuenta los efectos convectivos que no han sido explícitos en sus ecuaciones y reducen la inestabilidad atmosférica redistribuyendo humedad y temperatura sobre el área estudiada.

Un esquema de convección estima cuándo se libera la energía de inhibición convectiva en qué cantidad, cuánta precipitación se genera y como se reestabiliza la atmósfera tras una tormenta (Zhang 2011). Asimismo se representa la convección, por medio de cúmulos



que no llegan a producir precipitación, pero que pueden tener efectos importantes en el balance radiativo.

Este tipo de parametrización se emplea en el caso de trabajar con resolución de grilla gruesa, generalmente mayor a 10 km. Es recomendable desactivar el esquema cuando la resolución es menor a 5 km, ya que en estos casos el modelo puede resolver la convección en forma explícita y al activarlo se estaría sobreestimando los resultados.

La convección atmosférica es un proceso de interés en este estudio debido a que surge de una inestabilidad parcial del ambiente o diferencia de temperatura en la atmósfera. Al generarse una mezcla de aire, se expande la altura de la capa límite planetaria y provoca corrientes de aire que desarrollan cúmulos, disminución de los puntos de rocío en la superficie y el desarrollo de tormentas eléctricas que pueden incluir granizo y vientos fuertes.

#### 2.7.5. Parametrización de radiación

Los procesos que involucran a la radiación en WRF son tratados por esquemas diferentes en las dos regiones del espectro: radiación de onda corta (SW) y radiación de onda larga (LW). Los esquemas de SW parametrizan la absorción, dispersión y reflexión de la luz solar a través de la atmósfera y la tierra, mientras que los esquemas de LW parametrizan la absorción, dispersión y emisión de la radiación infrarroja termal.

La radiación solar es la fuente de energía que rige los procesos atmosféricos. La distribución de la energía sobre la superficie de la tierra no es uniforme, ya que la misma no es una esfera perfecta y se generan gradientes de temperatura que derivan en movimientos diversos de las masas de aire.

### 2.8. Emisiones químicas

#### 2.8.1. Emisiones antropogénicas

Estas emisiones son determinantes en la calidad del aire de centros urbanos y están asociadas a actividades humanas. Son todas aquellas asociadas a actividad vehicular, a la calefacción y la industria entre otras.

#### 2.8.2. Emisiones naturales

Constituidas por spray de mar, DMS oceánico y polvo del suelo. Los cálculos para conocer las tasas de emisión son función, tanto de las características de las superficies terrestres y oceánicas como de la velocidad del viento en la zona.

#### 2.8.3. Emisiones biogénicas

En este caso, las emisiones son producidas por los ecosistemas terrestres, incluyendo una gama muy amplia de especies químicas. Entre éstas podemos mencionar como predominantes a los compuestos orgánicos volátiles conocidos como VOC's. Este tipo de emisiones dependen de las condiciones meteorológicas, principalmente de la humedad relativa, la radiación y la temperatura.

#### 2.8.4. Emisiones por quema de biomasa

Son las que surgen de la quema de toda la materia orgánica producida por los seres vivos como consecuencia de sus actividades vitales, por ejemplo la madera, las hojas de

los árboles, cáscaras de frutos, excrementos de animales, restos de poda, aceites de plantas o animales, basuras orgánicas producidas por el hombre, residuos alimentarios, entre otros.

Éstas emiten una gran cantidad de contaminantes, tanto gaseosos como partículas.

El 90% de los incendios registrados son de origen antrópico y se relacionan con manejo de la tierra y prácticas agrícolas (Hao & Liu, 1994). La biomasa es también, empleada como una fuente de energía.

## 2.9. Inventarios de emisiones

Los modelos de calidad de aire utilizan bases de datos globales, regionales o nacionales para implementar en su desarrollo.

### 2.9.1. Inventarios globales

EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) es un inventario de cobertura global que combina varias fuentes de origen antrópico. Este inventario contiene emisiones para material particulado, mercurio y gases de efecto invernadero directos, precursores y acidificantes con una resolución espacial de  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  y una resolución temporal de un año. La información proporcionada por EDGAR está basada en niveles de actividad obtenidos de estadísticas internacionales y factores de emisión del IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change).

(<http://edgar.jrc.ec.europa.eu>)

La Agencia Ambiental de los Estados Unidos presentó un inventario nacional de emisiones a la atmósfera (NEI: National Emissions Inventory), dividido geográficamente en estados provinciales, regiones o ciudades. Éste proporciona información acerca de contaminantes criterio (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> entre otros) y clasifica de acuerdo a tipo de sector productivo (industria, agricultura, energía) y por tipo de fuente (puntual, vehicular, de área).

(<https://www.epa.gov/air-emissions-inventories>)

China ha desarrollado diversos inventarios de emisiones (MEIC: The Multi-resolution Emission Inventory for China), compilados por la Tsinghua University, de Beijing.

(<http://www.meicmodel.org/>)

En forma similar, el Reino Unido tiene su base de datos nacional organizada donde compila la información relevante para la estimación de las emisiones que afectan la calidad del aire o gases de efecto invernadero. (NAEI: National Atmospheric Emission Inventory).

(<http://naei.defra.gov.uk/overview/>)

Para la zona de Sudamérica no existen muchos inventarios regionales completos, salvo los compilados por las bases de datos globales como EDGAR.

### 2.9.2. Inventarios regionales

Los inventarios de emisiones globales tienen una resolución muy gruesa para su aplicación a escala local, resultan de gran utilidad para aquellos casos en que no existen bases de datos locales.

En el desarrollo de esta tesis, serán empleados inventarios globales que incorporen emisiones en los dominios de mayor escala, logrando proveer las condiciones de borde adecuadas para los dominios de resolución más final. Y dado que se cuenta con inventarios de emisiones locales; se incluirán bases de datos de elaboración propia. Los inventarios elaborados por el Grupo GEAA para diferentes contaminantes presentan un alto grado de avance y se sigue trabajando sobre los que ya están emitidos para lograr una continua actualización de los mismos. Esta tarea involucra una investigación muy detallada sobre las actividades y las fuentes emisoras de la región, y supone un gran aporte para el conocimiento y estudio de la calidad de aire local. Hasta el momento no se contaba con antecedentes para la zona.

El cálculo de las emisiones se realiza utilizando el procedimiento propuesto por el EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme). En este procedimiento el valor estimado para la emisión (E) de una especie individual (i), para un sector particular (n) se obtiene a partir de un factor de emisión (F); que sería la emisión potencial de una sustancia conocida, por unidad de referencia de un compuesto o producto y un nivel de actividad temporal (A), que puede referirse a valores de producción o consumo.

$$E(i) = F(i, n) \times A(n) \quad (7)$$

Con esta expresión, puede obtenerse un mapa reticulado de emisiones para cada contaminante, por sectores definidos.

Los inventarios se realizan a partir de las dos metodologías principales, de acuerdo a los datos disponibles con el fin de garantizar la precisión de las estimaciones realizadas. La primera de ellas es la de tipo “Bottom-up”, empleada para fuentes puntuales para cuyo caso se cuenta con niveles de actividad o pueden estimarse con la disponibilidad de información. La segunda opción es la “Top-down” que se utiliza para fuentes de área para las cuales los datos disponibles están a escala regional con una menor desagregación.

## Capítulo III : MODELADO y CASOS DE ESTUDIO

### 3.1. Dominios de modelado

Para la simulación de las precipitaciones se utilizó la versión 3.5 del modelo regional acoplado Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with Chemistry (WRF-Chem) (Grell et al., 2005) (Skamarock, 2008). WRF-Chem fue configurado con tres dominios anidados (d01-d02-d03, ubicados del más externo al más interno) como se ven en la Figura 13.

Los dominios de modelado comprenden la parte central de Argentina y Chile, con una resolución espacial de 36, 12, 4 km respectivamente; cuya coordenada vertical es de 50 niveles, hasta una altura de 50 hPa, centrados en Latitud  $34^{\circ} 4'33.60''S$  y Longitud  $68^{\circ}32'38.40''O$ .

El tamaño y ubicación de los dominios fue seleccionado de tal manera de incluir la región de los Andes Centrales con las principales cuencas hidrográficas que forman parte de ésta y, además, parte del Océano Pacífico hacia el oeste para estimar la influencia del mismo sobre la humedad y las precipitaciones regionales.

Los Andes Centrales es una región importante porque contiene el área metropolitana más grande de Chile, Santiago y la cuarta ciudad más grande de Argentina, Mendoza.

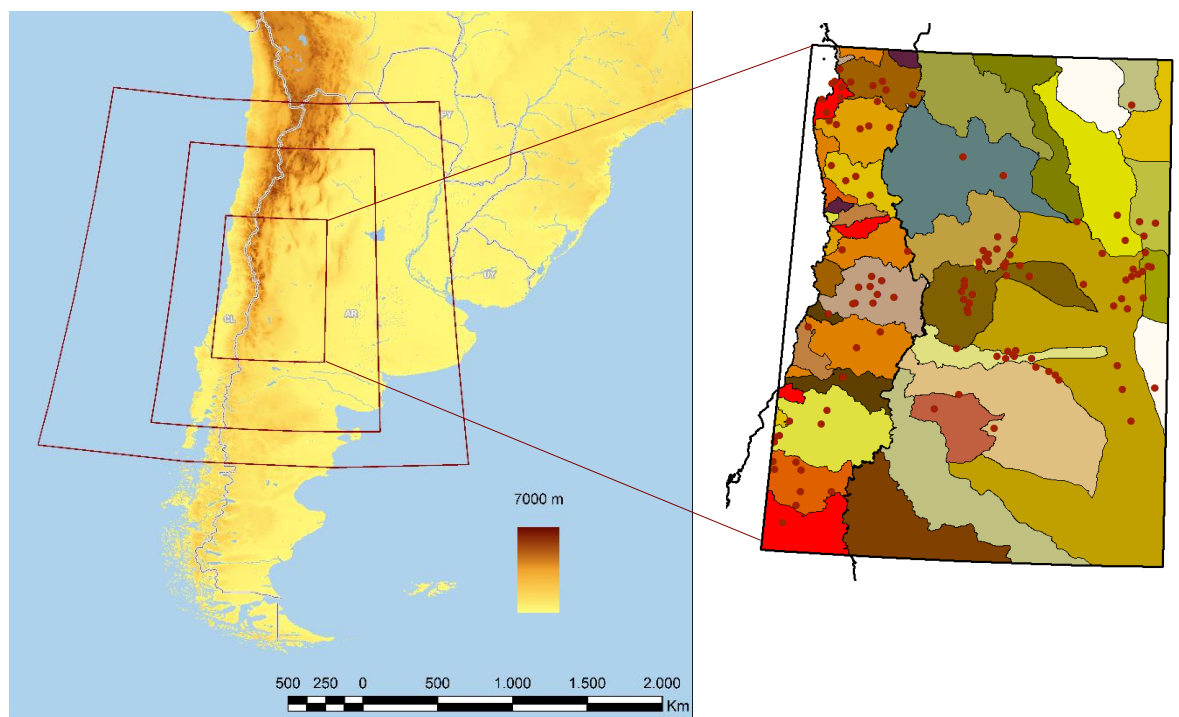


Figura 13. Dominios anidados definidos para las simulaciones. Región de estudio: Los Andes Centrales. Cuencas y estaciones meteorológicas de precipitación del dominio pequeño d03 (puntos rojos) con cantidad de datos de precipitación significativa para los meses de enero y febrero de 2013-2014

La mayor resolución, dominio pequeño (d03), en el cual se ajusta el modelo, abarca el Sur de las provincias de San Juan y La Rioja, el Oeste de San Luis, Noroeste de La Pampa, Norte de Neuquén y la provincia de Mendoza en su totalidad respecto a la Argentina. En

cuanto Chile, el mismo incluye IV Región de Coquimbo, V Región de Valparaíso, Región Metropolitana, VI Región de O'Higgins y VII Región de Maule.

Con el propósito de validar la modelación, se recolecta la información de un total de 121 estaciones meteorológicas, pertenecientes a seis diferentes instituciones, incluyendo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

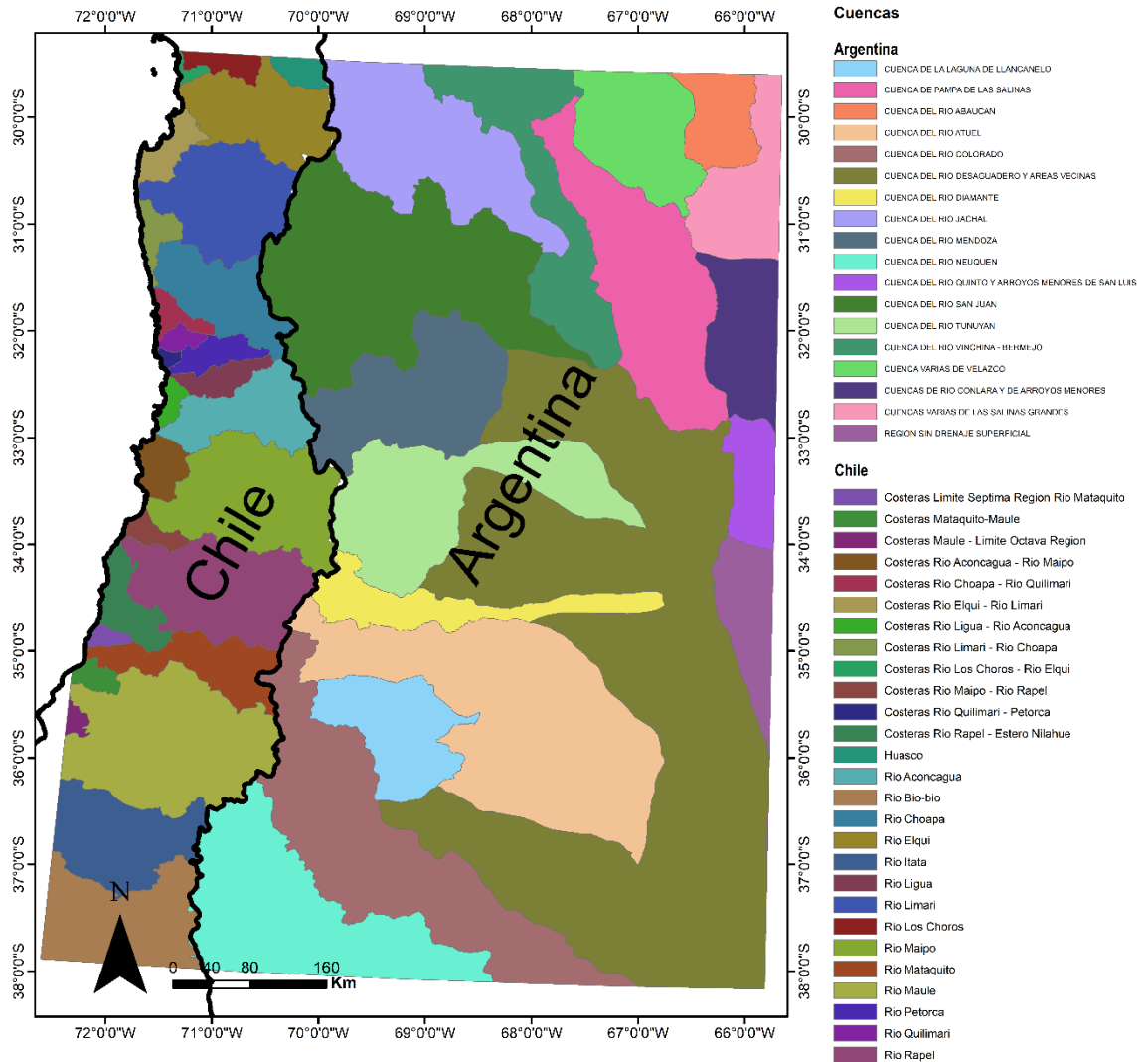


Figura 14. Cuencas hidrográficas de Argentina y Chile, dentro del área de estudio

### 3.2. Configuración de modelo

Varias opciones de configuración fueron incluidas en el modelo, de acuerdo a casos de estudios previos, que probaron su idoneidad para producir las mejores estimaciones de variables meteorológicas de superficie y altura; otras fueron probadas en el desarrollo de la presente tesis a fin de optimizar una configuración apropiada para predecir la precipitación líquida en la región de Los Andes Centrales.

### 3.2.1. Datos de entrada

#### 3.2.1.1. Elevación del terreno

Las características del terreno se incorporaron utilizando los datos de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), disponibles en una resolución de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m) cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey, 2017) con una resolución aproximada de 90 m.

Incluyendo estos campos en las simulaciones, se reducen las imprecisiones del modelo que pueden generarse al emplear los datos de entrada por defecto (Cremades, 2017). Así, estamos logrando una mejora notable en las predicciones obtenidas.

#### 3.2.1.2. Uso y cobertura del suelo

Se utilizaron los mapas de vegetación del Proyecto Global Land Cover 2000 (GLC 2000) para América del Sur, con una resolución de 1 km y los datos generados por el Departamento de Geografía de la Universidad de Maryland (UMD Global Land Cover). Características del uso y cobertura del suelo (Hansen et al., 1998). Esto se combinó con la base de datos de iluminación permanente del programa Operational Linescan System of DMSP - OLS (NOAA-NGDC, 2010) para una mejor identificación de los centros urbanos, áreas cultivadas y zonas montañosas.

#### 3.2.1.3. Meteorología

El modelo se alimentó con las condiciones iniciales y de borde del Sistema Global Forecast model (GFS) del Centro Nacional para la Predicción Ambiental (NCEP) con una resolución de 0.5 grados y se actualiza cada 6 horas.

#### - Temperatura de superficie del mar (SST)

Se utilizaron valores de SST actualizados diariamente, obtenidos con satélite, con resolución espacial 1/12 grados procedentes del análisis global NCEP SST.

### 3.2.2. Resolución

En el marco de esta tesis,  $\Delta x$  y  $\Delta y$  son constantes e idénticas para el diseño regional por lo que se emplearon 36km, 12km y 4km de acuerdo a los tres dominios d01, d02 y d03 respectivamente, y se propusieron 50 niveles verticales de  $\eta$  y una presión de 50hPa.

### 3.2.3. Física

#### 3.2.3.1. Superficie

En este trabajo se utiliza el modelo de suelo NOAH LSM. Es un modelo de última generación y surge del enfoque sobre el acoplamiento diario de la evotranspiración, del modelo de suelo con múltiples capas y del modelo primitivo de cortina forestal. Está basado en el "Oregon State University (OSU) LSM", que fue desarrollado por (Pan & Mahrt, 1987) y por (Chen et al.;1996) . Comparando con datos del experimento FIFE, (Chen et al.; 1996)encontraron que el OSU LSM se comportaba a la altura de modelos más complejos. Su balance entre simplicidad y error, lo llevaron a ser implementado en el modelo operacional del NCEP ETA y en el modelo MM5 de NCAR. Este modelo divide

el suelo en 4 capas de grosores: 10 cm, 30 cm, 60 cm y 100 cm, hasta una profundidad total de 2 metros.

#### 3.2.3.2. Capa límite

El esquema de capa límite planetaria YSU, aumenta la mezcla de la capa límite en el régimen de convección libre inducida térmicamente y la disminuye en el régimen de convección forzada inducida mecánicamente, lo que reduce problemas en pronósticos de rango medio. También con este esquema se ve resuelta la mezcla excesiva en la capa mixta en presencia de fuertes vientos (Hong, 2010).

#### 3.2.3.3. Microfísica

En esta tesis, debemos considerar los efectos indirectos de aerosoles en WRF/Chem, por eso se emplea un esquema de microfísica de nubes y precipitaciones con dos momentos. Esto quiere decir, que se incluyen ecuaciones de resolución para la densidad de partículas y para la razón de mezcla existente entre las distintas especies.

Cuando se trabaja con resoluciones muy pequeñas, para que el modelo resuelva de forma explícita la presencia de nubes, el esquema más apropiado es el Morrison double-Moment scheme (Morrison et al., 2005) (Morrison, 2011).

#### 3.2.3.4. Radiación

Se ha empleado para trabajar la combinación de radiación SW/LW: Goddard/RRTMM debido a que son los esquemas que permiten inclusión de aerosoles en WRF-Chem (Molina et al., 2015) ya que éstos incorporan el efecto de las propiedades ópticas de aerosoles y algunos gases.

La elección de las parametrizaciones descritas anteriormente, son aquellas que proporcionan una mejor descripción del área de estudio. Generalmente las validaciones se han realizado en regiones de topografía llana, con cobertura vegetal uniforme. Para que este estudio fuese real, los esquemas seleccionados quedaron sujetos a la experiencia obtenida por el grupo GEAA en la región de estudio. El desempeño de éstas se mostró en trabajos anteriores, (Cremades et al., 2011), (Mulena et al. 2011), (Allende et al. 2012), (Puliafito et al. 2015), (Mulena et al. 2016), (Cremades et al. 2017), (Cremades, 2017) entre otros.

La Tabla 1 resume las parametrizaciones empleadas en el marco de esta tesis.

#### 3.2.4. Química

Fue activada durante la etapa de inclusión de inventarios al modelo y se describe en la Sección 3.7.

PARAMETRIZACIÓN	ESQUEMA
DATOS DE ENTRADA	
Topografía	SRTM3
LULC	GLOBCOBER+DMPS-OLS
Meteorología IC/BC	Reanalysis NCEP-GFS
SST	Defecto/NCEP_diaria*
RESOLUCIÓN	
Espacial (d01/d02/d03)	$\Delta x, \Delta y$ (km)= 36, 12, 4
Vertical	$\Delta z$ (ETA levels)= 50
FÍSICA	
Superficie	Noah Land Surface Model
PBL	YSU
Microfísica	Morrison – Double Moment
Radiación onda larga	RRTM
Radiación onda corta	Goddard Dudhia
Cúmulos	KF/BMJ/GD *
QUÍMICA *	
Fase gaseosa	CBM-Z
Aerosoles	MOSAIC 4 bin module
Química IC/BC	MOZART-4
Inventario de emisiones Global	EDGAR
Inventario de emisiones Regional	Inventario propio - GEAA

Tabla 1. Configuración del modelo WRF-Chem para las simulaciones de precipitaciones  
(\*Estas son las configuraciones que se trabajaron en el marco de esta tesis)

### 3.3. Períodos de simulación

Las parametrizaciones propuestas para estudiar durante el desarrollo de este trabajo fueron probadas durante 8 distintas quincenas de los meses de enero y febrero en los años 2013 y 2014 como indica la Tabla 2.

Si bien se trabajó con la información de las estaciones meteorológicas que contenían la mayor cantidad de datos, no en todas ellas se hallaron datos confiables para realizar una comparación en todo el período, en toda el área de estudio. Es por ello, que los períodos fueron seleccionados dado el buen registro de precipitaciones en la región argentina en la ladera oeste de la Cordillera de Los Andes (Pascual Flores et al. 2015) y de acuerdo a la robustez de la base de datos observados.

QUINCENA	COMIENZO	FIN
QA	01/01/2014	14/01/2014
QB	15/01/2014	31/01/2014
QC	01/02/2014	14/02/2014
QD	15/02/2014	27/02/2014
QE	01/01/2013	14/01/2013
QF	15/01/2013	30/01/2013
QG	01/02/2013	14/02/2013
QH	15/02/2013	28/02/2013

Tabla 2. Quincenas simuladas con WRF-Chem para analizar efectos de las diferentes parametrizaciones sobre las precipitaciones acumuladas



Para un estudio más específico también se llevó a cabo la identificación de eventos particulares de precipitación dentro de cada quincena de estudio que se detallan en la Tabla 3. Dentro de cada quincena se desarrollaron hasta 6 eventos dependiendo el caso, en los cuales se detalla la fecha precisa de ocurrencia, mientras que con (X) se señala la no ocurrencia.

QUINCENA	EVENTO 1	EVENTO 2	EVENTO 3	EVENTO 4	EVENTO 5	EVENTO 6
QA	X	X	X	X	X	X
QB	1/17/2014	1/18/2014	1/29/2014	X	X	X
QC	2/13/2014	2/14/2014	X	X	X	X
QD	2/15/2014	2/16/2014	2/20/2014	2/24/2014	2/25/2014	X
QE	1/4/2013	1/12/2013	1/13/2013	X	X	X
QF	1/16/2013	1/17/2013	1/19/2013	1/20/2013	1/28/2013	1/30/2013
QG	2/2/2013	2/7/2013	2/9/2013	2/10/2013	X	X
QH	2/15/2013	X	X	X	X	X

Tabla 3. Fecha de los eventos simulados y analizados con WRF

### 3.4. Optimización de la configuración de WRF

La primera fase de este estudio, se llevó a cabo con la química del modelo desactivada para realizar en primera instancia un análisis que nos permitiera obtener las primeras aproximaciones a una representación de las precipitaciones lo más similares a los eventos observados dentro del área de estudio (d03).

#### 3.4.1. Temperatura de la Superficie del Mar (SST)

Observaciones de la naturaleza de la interacción atmósfera-océano sobre frentes oceánicos han revelado que la Temperatura de la Superficie del Mar (SST, por sus siglas en inglés) es un parámetro importante para la estimación de flujos de calor y sistemas de vientos locales en zonas costeras con influencia en la humedad y precipitaciones (Borge et al., 2008). El objeto de la consideración de este parámetro es ver la capacidad del modelo de percibir la influencia, lo cual es relevante en pequeñas escalas.

Para ciertas simulaciones, como en el caso de simulaciones temporales, de carácter predictivo es necesario emplear el módulo acoplado océano-atmósfera (Tombrou et al., 2015) (Song et al., 2009)

Dentro del marco de esta tesis se intenta lograr un avance respecto de la influencia de la SST en un modelo de mesoescala, lo cual resulta complicado e interesante de implementar porque es el nudo de los modelos acoplados atmósfera-océano.

En tal sentido, la motivación inicial fue la de evaluar la sensibilidad del modelo, a dos opciones de inclusión de SST:

- a) en una configuración por defecto del modelo, donde SST es un campo constante en el momento inicial de la simulación, en resolución espacial de 1 grado de latitud y longitud que se corresponde con el valor medio anual (Skamarock et al., 2008);
- b) la utilización de valores de SST actualizados diariamente, obtenidas con satélite, con

resolución espacial 1/12 grados procedentes del análisis global NCEP SST.

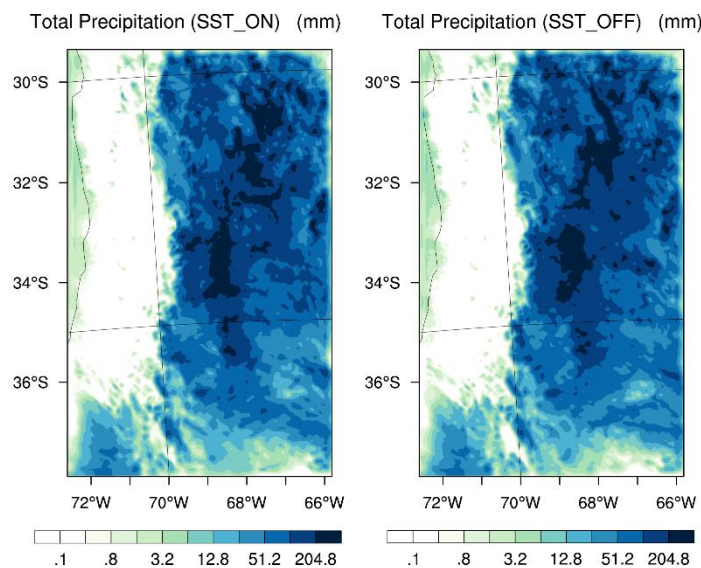


Figura 15. Precipitación total acumulada para las configuraciones (a) SST\_ON, (b) SST\_OFF en WRF, para la quincena QC

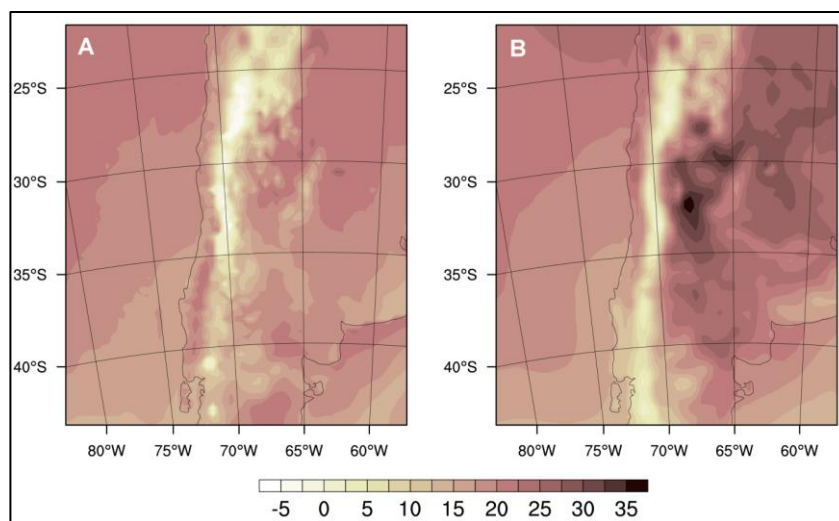


Figura 16. Temperatura de superficie y datos de SST (°C)

- A) actualizados diariamente (SST\_ON) a partir de datos diarios del análisis global NCEP SST con resolución espacial 1/12 grados (la imagen muestra sólo un día del período de simulación)  
 B) SST invariantes en el tiempo (SST\_OFF) constante para todo el período de simulación

Si bien la validación para modelación de precipitaciones requiere gran cantidad de información disponible y consideraciones sobre la evolución meteorológica del evento analizado en esta fase, sólo se pretende alcanzar una aproximación lo más real posible.

En las Figuras a continuación pueden observarse las precipitaciones totales acumuladas para las dos configuraciones y la diferencia entre ambas para las quincenas con resultados más significativas en cuanto a cantidad de precipitación total.

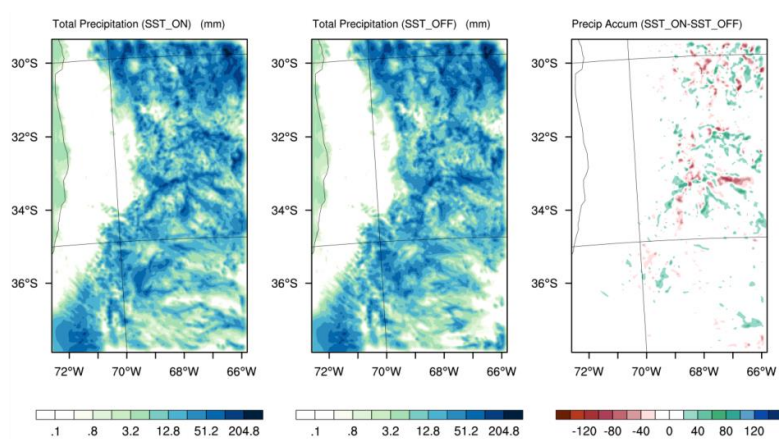


Figura 17. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la segunda quincena del mes de enero de 2014 (QB) y diferencia entre ambas configuraciones

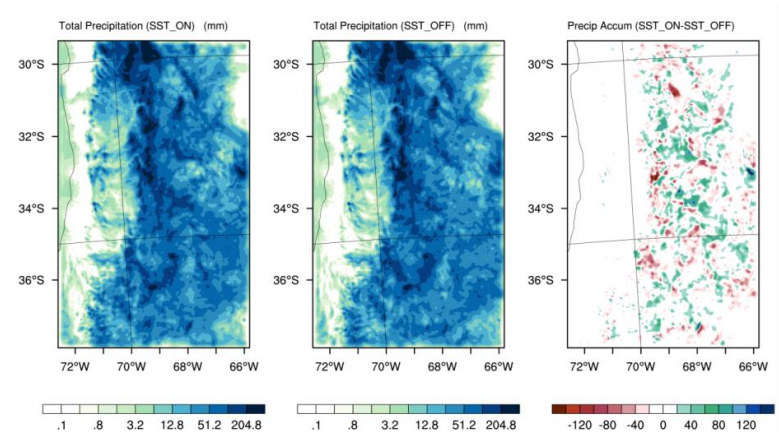


Figura 18. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la segunda quincena del mes de enero de 2013 (QF) y diferencia entre ambas configuraciones

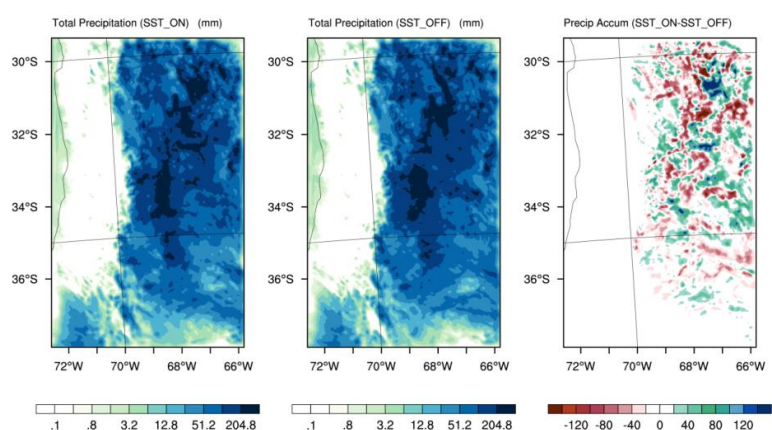


Figura 19. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la primera quincena del mes de febrero de 2014 (QC) y diferencia entre ambas configuraciones

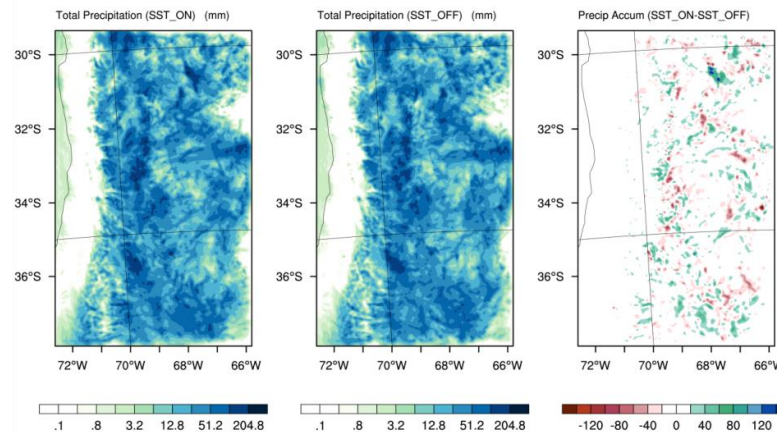


Figura 20. Simulación en WRF de precipitación total acumulada para la primera quincena del mes de febrero de 2013 (QH) y diferencia entre ambas configuraciones

### 3.4.2. Esquemas de parametrización de cúmulos (ECP)

Los ECP se diferencian en la forma en que consideran la Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) y el mecanismo de disparo para la superación de la inhibición convectiva.

El esquema Kain-Fritsch (KF) (Kain & Fritsch, 1990) (Kain, 2004) es un esquema de flujo de masa que utiliza un modelo simple de nubes que incluye flujos ascendentes y descendentes y los efectos del arrastre por convección. Está diseñado para redistribuir la masa de aire en una columna atmosférica, con el objetivo de disipar la energía potencial disponible. KF genera procesos convectivos si los datos de las condiciones iniciales disponen de CAPE.

A diferencia del KF, el Betts-Miller-Janjic (BMJ) (Betts & Miller, 1986) (Janjić, 1994) es un esquema de control de capa profunda, lo que significa que elimina el CAPE sin tener en cuenta el forzamiento superficial. Por lo tanto, no es capaz de retener CAPE durante largo tiempo en la atmósfera sin producir convección. Se relaciona con perfiles variables de temperatura y humedad determinados a partir de consideraciones termodinámicas.

La parametrización de convección propuesta por Grell-Devenyi (GD) (Grell & Devenyi, 2002) es, de hecho, un conjunto de parametrizaciones que se lanzan en cada punto de grilla y se promedian para obtener el resultado final, que se introduce de vuelta en la atmósfera del modelo. Los conjuntos son de 144 miembros, todos ellos esquemas de flujo de masa, en los que se varían parámetros, como los que regulan la mezcla del aire ascendente o descendente con su entorno, o la eficiencia de la precipitación. Es un ensamble de esquemas para resoluciones gruesa y fina.

Un esquema de convección estima cuándo se libera la energía de inhibición convectiva en qué cantidad, cuánta precipitación se genera y como se reestabiliza la atmósfera tras una tormenta (Zhang et al., 2011). Asimismo se representa la convección somera, por medio de cúmulos que no llegan a producir precipitación, pero que pueden tener efectos importantes en el balance radiativo.

Con el propósito de comparar el desempeño de las configuraciones de WRF se estimó la distribución espacial de la precipitación acumulada en cada quincena simulada y también

por cada evento de precipitación para una mayor precisión. La Figura 21 muestra, por ejemplo, la precipitación total simulada para las 3 variantes de ECP (KF, BMJ y GD) y la formulación explícita (EXP) para para la segunda quincena del mes de febrero del año 2014 (QD).

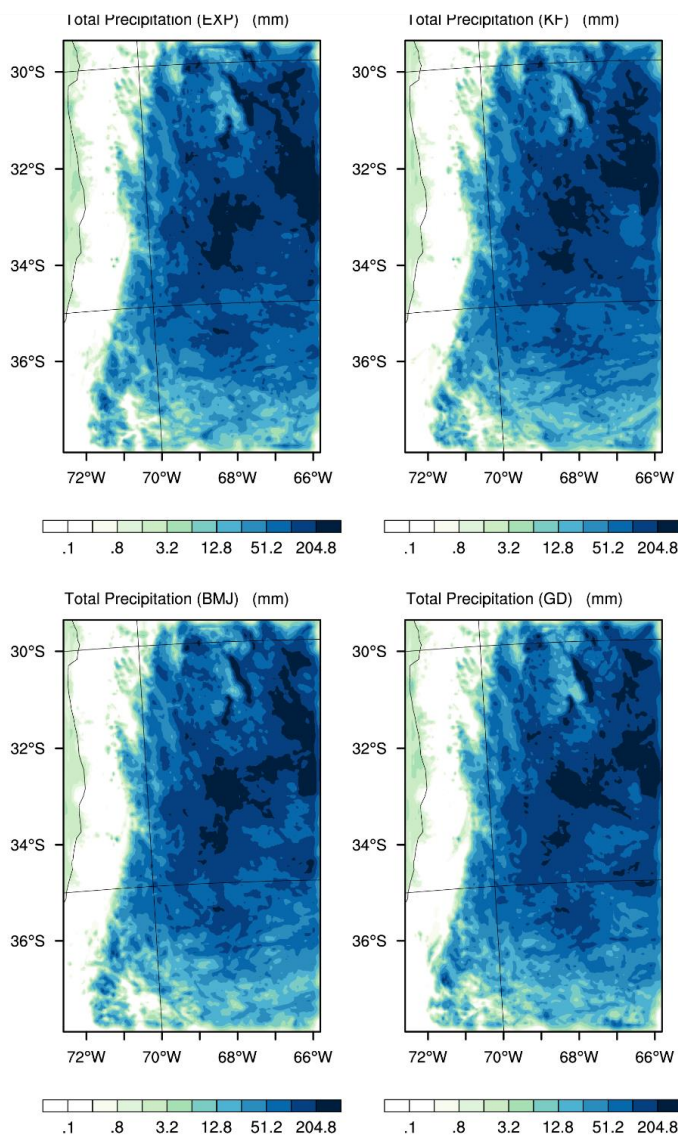


Figura 21. Precipitación acumulada en el dominio de estudio, para un período de tiempo definido (segunda quincena del mes de febrero de 2014\_QD), simulada con los diferentes ECP del modelo WRF versión 3.5

Se comienza el análisis con la comparación entre las predicciones de los diferentes esquemas convectivos, de manera de examinar los patrones generados por los diversos ECP. El empleo del producto satelital TRMM 3B42, es utilizado sólo como una herramienta para visualizar si el modelo logra reproducir la distribución espacial de las precipitaciones.

El algoritmo 3B42 de TRMM (Huffman et al., 2007) produce estimaciones de precipitación en mm ajustadas por un método combinado TRMM-IR. En las mismas, se presentan datos grillados de precipitación (mm) y estimaciones de error con una resolución temporal diaria



y 0,25 x 0,25 grados de resolución espacial. La cobertura espacial total se extiende desde los 50° de latitud N hasta los 50° de latitud S.

Teniendo en cuenta, que la resolución es casi 6 veces menor que la resolución del dominio de WRF, es necesario llevar a cabo un regrillado (interpolación espacial) para realizar la comparación en una escala homogénea.

ESMF\_regrid\_gen\_weights es parte de un conjunto de rutinas de regridding basadas en el software Earth System Modeling Framework (ESMF). “Parche” es uno de los métodos de una técnica llamada "parche de recuperación" que se usa comúnmente en el modelado de elementos finitos. Por lo general, resulta en mejores aproximaciones a los valores y derivados en comparación con la interpolación bilineal.<sup>1</sup>

A manera de ejemplo, se muestran un evento en la Figura 22, ocurrido entre los días 25 y 26 de febrero del año 2014, el cual fue seleccionado debido a la cantidad de precipitación acumulada y a que son evidentes las diferencias en la variable de análisis.

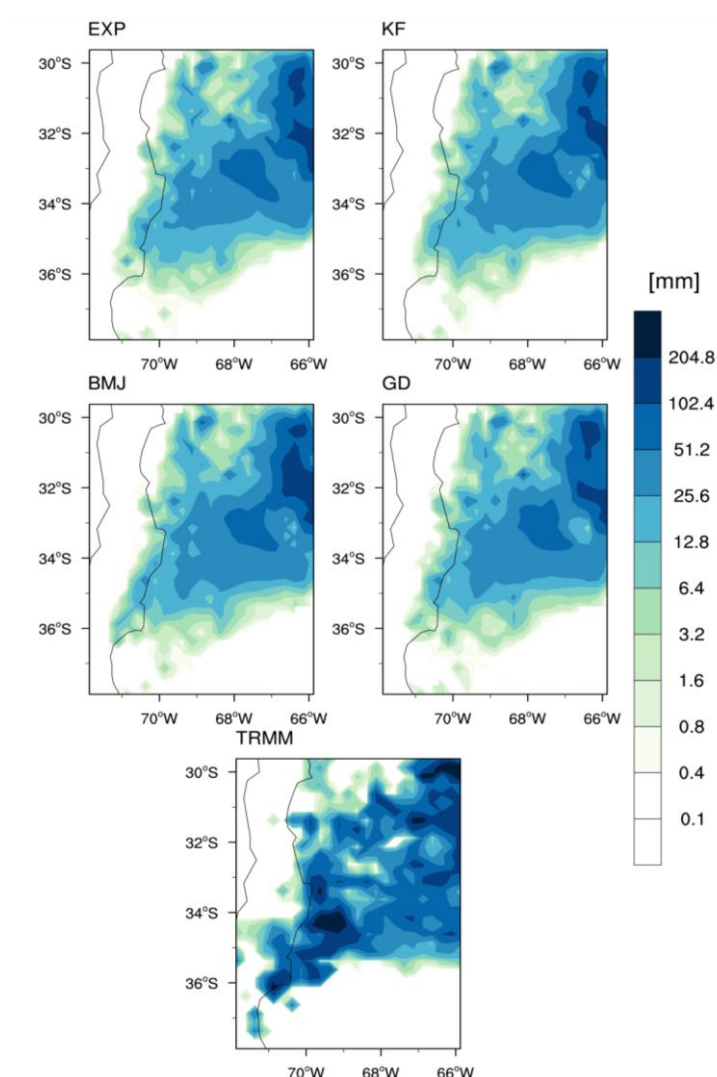


Figura 22. Simulaciones de WRF de precipitación total acumulada (mm) con todas las variantes de ECP para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2014 en la quincena QD

<sup>1</sup> NCAR COMMAND LANGUAGE

[https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/ESMF/ESMF\\_regrid\\_gen\\_weights.shtml](https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/ESMF/ESMF_regrid_gen_weights.shtml)

A partir del análisis de la misma puede comprobarse que el modelo es capaz de reproducir, de manera satisfactoria, las principales características de los patrones generados por los eventos de precipitaciones en el dominio de estudio más pequeño d03.

Las mediciones muestran que en general WRF captura bien las precipitaciones en todas las cuencas aunque la sensibilidad a las condiciones iniciales y de contorno propuesta no es demasiado grande.

En general, todos los esquemas tienden a sobrestimar la precipitación, mayormente en la cuenca del Río Atuel y Diamante, aunque en todos los casos la distribución de la precipitación es similar a las observaciones. Por otro lado, los esquemas GD y KF parecen producir levemente mejores predicciones cuantitativas al equilibrar tanto la distribución espacial como la intensidad.

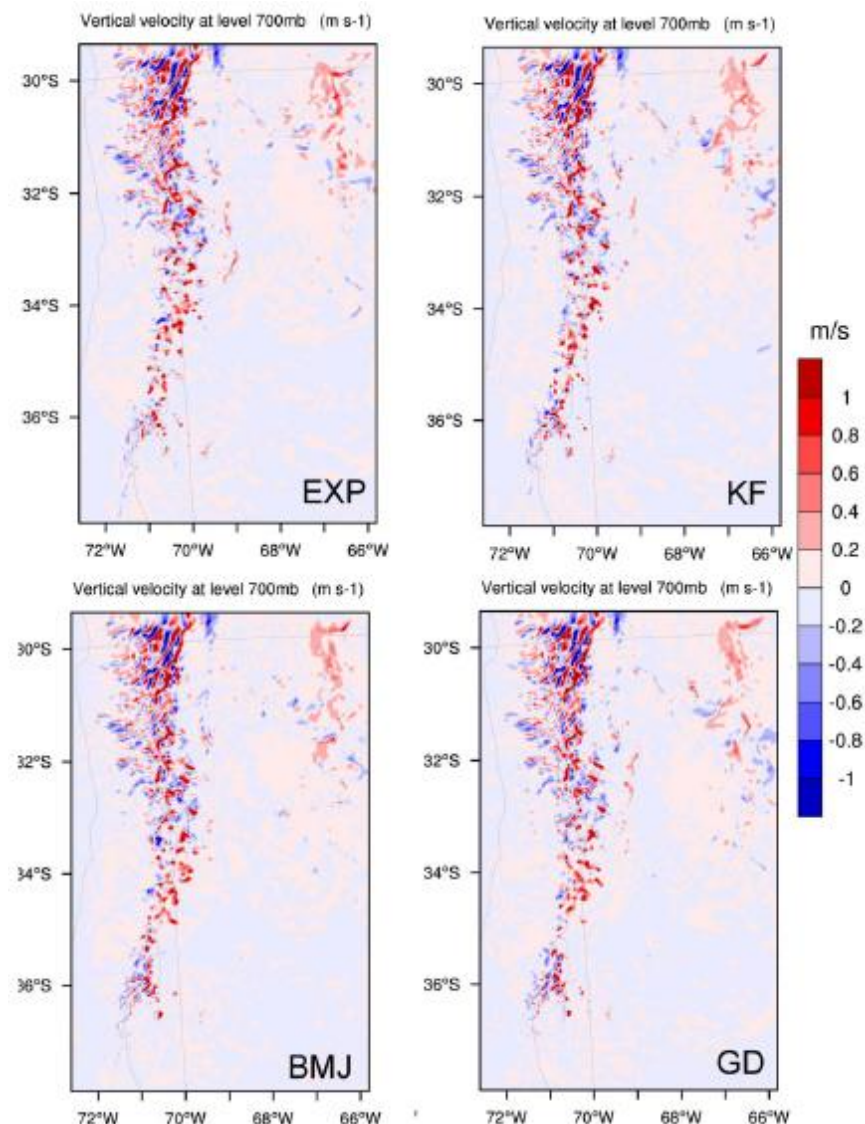


Figura 23. Estructuras de velocidades verticales a 700mb para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2014 en la quincena QD

La Figura 23 muestra que, empleando las parametrizaciones de cúmulos KF y GD, las simulaciones predicen corrientes ascendentes y descendentes más fuertes en la región cordillerana, pero muestran diferencias hacia el este del dominio.

Debido a esto, se propone realizar un corte sobre la zona más variable y llevar a cabo un pequeño análisis sobre la humedad relativa en los puntos de mayor variabilidad.

A continuación se muestra el análisis de la variación vertical de humedad relativa a la latitud 32.5°S para analizar la convección en la zona.

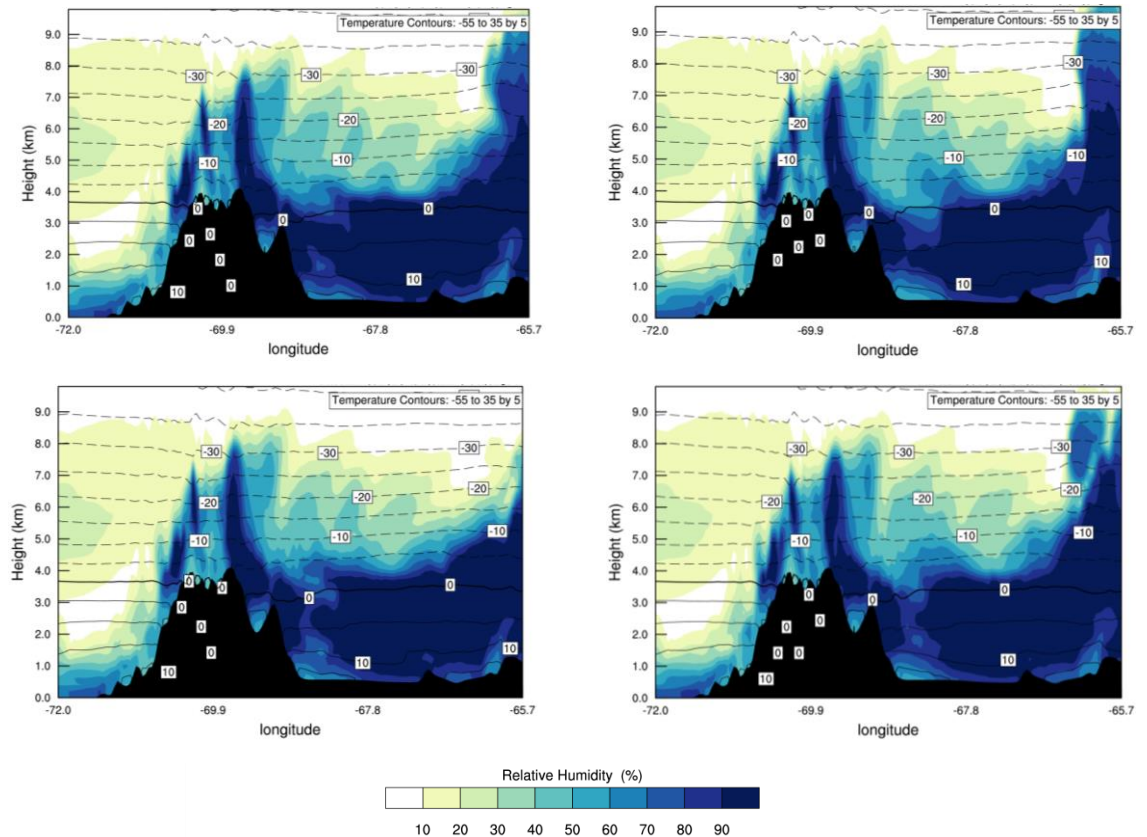


Figura 24. Perfiles verticales de humedad relativa para una latitud de 32.5°S y 22UTC para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2014 en la quincena QD

Se analiza la convección profunda, que genera una mezcla turbulenta impulsada térmicamente, donde los movimientos verticales toman parcelas de la atmósfera inferior por encima de los 500hPa (5km aproximadamente). Puede observarse que en las parametrizaciones KF y GD las corrientes de aire ascendente son más fuertes y localizadas (Figura 24). Las principales diferencias se dan entre los 5 y 10 km de altura atmosférica, mayormente sobre la Cuenca Pampas Salinas y la Cuenca Río Conlara al noreste del dominio. Además, teniendo en cuenta que la hora analizada es la del evento, considerando un estudio horario del desarrollo convectivo se pudo observar que el ascenso de las corrientes va aumentando progresivamente, alcanzando grandes alturas durante el período analizado.

A pesar de que el empleo de diferentes ECP genera predicciones de características similares, el desempeño del modelo con los diferentes esquemas a lo largo del dominio es



variable. Esto no es sorprendente, ya que cada ECP posee asunciones y especificaciones de parámetros que los hacen más apropiados para cada región de estudio, pero complica su uso en dominios de tamaño regional, con diferentes características.

Cambios en las parametrizaciones convectivas implican diferencias en el transporte de humedad regional dentro de una subregión particular. Estos cambios de circulación interactúan con los cambios en la eficiencia local con las que se produce la precipitación y las retroalimentaciones que de aquí surgen pueden alterar potencialmente las características hidrológicas de la región en estudio.

En los eventos estudiados, la configuración KF presenta mejores distribuciones espaciales de precipitación acumulada respecto de las demás, mientras que GD es la mejor configuración en la predicción de la cantidad precipitada.

De igual manera, es relevante destacar que los efectos de la configuración del modelo WRF para simulaciones de precipitación pueden no ser aparentes cuando se analizan sobre períodos de tiempo grande, pero existen notables diferencias en una base diaria o en el análisis de eventos particulares. En tal sentido, la aplicación ciega del modelo WRF no es recomendable, siendo necesario examinar siempre las simulaciones de forma cuidadosa.

Para realizar la selección de las parametrizaciones más acertadas, se realizó un análisis estadístico, tanto cualitativo como cuantitativo para ambas propuestas.

### 3.5. Análisis estadísticos

Empleando la herramienta de software matemático MatLab, se logró realizar un análisis punto a punto para comparar los datos de pluviómetros con la salida correspondiente del modelo.

#### 3.5.1. Análisis cualitativo

Se consideró a la precipitación como un evento binario simple, es decir “llueve” o “no llueve” y se trabajó en su análisis categórico con los elementos señalados en la Tabla 4. Los pronósticos de precipitación de WRF se compararon con las mediciones que se reunieron de las estaciones meteorológicas. Con el propósito de validar la modelación, se sustrajo la información de un total de 121 estaciones meteorológicas situadas dentro del dominio, pertenecientes a seis diferentes instituciones, incluyendo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). No en todas ellas se hallaron datos válidos para realizar una comparación en todo el período, en todas las cuencas.

Los elementos de la tabla de contingencias son: aciertos (pronóstico correcto y observación del evento), errores (se observa el evento pero no es pronosticado), falsas alarmas (se da un pronóstico positivo pero no se observa el evento) y correctamente rechazados (previsión correcta de no-evento).

		OBSERVACION		
		SI	NO	
PREDICCION	SI	a ACIERTOS	b FALSAS ALARMAS	a + b SI PREDICHO
	NO	c ERRORES	d CORRECTAMENTE RECHAZADOS	c + d NO PREDICHO
		a + c SI OBSERVADOS	b + d NO OBSERVADOS	N TOTAL DE PREDICCIONES

Tabla 4. Tabla de contingencias. Los recuentos de a, b, c, y d son el número total de aciertos, falsas alarmas, errores y rechazos correctos

Sobre la base de la tabla se realizó una serie de análisis estadísticos donde se analizó el rendimiento de previsión y se hizo una comparación de resultados entre las simulaciones con las diferentes configuraciones propuestas. En base a estos elementos se calcularon los siguientes indicadores:

#### 3.5.1.1. Sesgo (BIAS)

$$BIAS = \frac{a+b}{a+c} = \frac{\text{Eventos predichos}}{\text{Eventos observados}} \quad (8)$$

Siendo, B = 1 imparcial, B < 1 subestima el resultado, B > 1 sobreestima el resultado.

#### 3.5.1.2. Probabilidad de detección – Tasa de éxito (POD)

$$POD = \frac{a}{a+c} = \frac{\text{Aciertos}}{\text{Eventos observados}} \quad (9)$$

Indica la fracción de todos los eventos observados, correctamente predichos. Está centrado en el acontecimiento y no pena falsas alarmas.

Debe adquirir un valor dentro del rango  $0 \leq POD \leq 1$ , donde la mejor puntuación es  $POD = 1$ . Que se obtenga la mejor puntuación no significa que la predicción haya sido perfecta.

#### 3.5.1.3. Tasa de falsa alarma (FAR)

$$FAR = \frac{b}{a+b} = \frac{\text{Falsas alarmas}}{\text{Eventos observados}} \quad (10)$$

Representa la fracción de los eventos previstos que resultaron ser falsas alarmas.

Toma valores del rango  $0 \leq FAR \leq 1$ . La mejor puntuación obtenida es  $FAR = 0$ , considerando que alcanzar la mejor puntuación no significa estar realizando una predicción perfecta.

#### 3.5.1.4. Probabilidad de detección falsa –Tasa de falsas alarmas (POFD)

$$POFD = \frac{b}{b+d} = \frac{\text{Falsas alarmas}}{\text{No - eventos}} \quad (11)$$

Con el indicador POFD se evalúa la fracción de todos los no-eventos cuando el pronóstico predijo un evento. Los valores que puede tomar son  $0 \leq POFD \leq 1$ , siendo su mejor puntuación  $POFD = 0$ . La mejor puntuación no implica una predicción perfecta.

#### 3.5.1.5. Precisión – Fracción correcta (ACC)

$$ACC = \frac{a+d}{N} = \frac{\text{Predicciones correctas}}{\text{Total de predicciones}} \quad (12)$$

A través de este cálculo se obtiene la fracción de todas las predicciones que resultaron correctas ( $0 \leq ACC \leq 1$ ), donde la mejor puntuación es  $ACC = 1$ . La mejor puntuación no supone una predicción perfecta. Un evento anormal en el marcador es considerado como un no-evento.

#### 3.5.1.6. Proporción de probabilidades (OR)

Indica cuál es la relación que existe entre las probabilidades de que un pronóstico de SI sea correcto y las probabilidades de que un pronóstico de SI sea incorrecto.

$$OR = \frac{a \times d}{c \times b} = \frac{\text{Aciertos} \times \text{Correctamente rechazados}}{\text{Errores} \times \text{Falsas alarmas}} \quad (13)$$

### 3.5.2. Análisis cuantitativo

Con el fin de evaluar las predicciones del modelo con las observaciones, (Chang & Hanna, 2004) recomiendan el uso de una serie de medidas de desempeño estadísticas.

#### 3.5.2.1. Fracción de predicciones dentro de un factor de 2 observaciones (FAR2)

El factor de dos se define como la fracción de las predicciones cuyo valor se haya dentro de un factor de dos respecto de los valores observados.

$C_o$  y  $C_p$  son precipitaciones observadas y predichas.

$$0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2 \quad (14)$$

### 3.5.2.2. Error medio cuadrático (RMSE)

Es la magnitud promedio de los errores del pronóstico. En las predicciones del modelo se cuantificará en términos de las unidades de la variable calculada. Este estadístico cuantifica cuán diferente es un conjunto de valores respecto de las observaciones. Cuanto más pequeño es un valor RMSE, más cercanos son los valores predichos y observados.

$C_{oi}$  y  $C_{pi}$  son las precipitaciones observadas y predichas para  $N$  casos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{oi} - C_{pi})^2} \quad (15)$$

### 3.5.2.3. Sesgo Fraccional (FB)

En este caso el sesgo es normalizado para obtener un indicador adimensional que puede ser evaluado en forma objetiva, independientemente de la magnitud de las variables tratadas. Indica errores sistemáticos que conducen a subestimar o sobreestimar los valores medidos. Puede oscilar entre  $+2$  y  $-2$ , siendo  $FB=0$  el valor ideal.

$\overline{C_o}$  y  $\overline{C_p}$  son los promedios de las precipitaciones observadas y predichas.

$$FB = \frac{\overline{C_o} - \overline{C_p}}{\frac{(\overline{C_o} + \overline{C_p})}{2}} \quad (16)$$

Para este análisis, un valor positivo indica que el modelo estaría subestimando y un valor negativo que estaría sobreestimando.

### 3.5.2.4. Bias (BIAS)

Es una medida de comparación entre la magnitud de pronóstico promedio y la magnitud observada promedio. Se refiere a la tendencia de un proceso de medición a sobreestimar o subestimar el valor de un parámetro.

$C_{oi}$  y  $C_{pi}$  son las precipitaciones observadas y predichas para  $N$  casos.

$$BIAS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{pi}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{oi}} \quad (17)$$

### 3.5.2.5. Índice de acuerdo

El índice de acuerdo, desarrollado por Willmott en 1981, es una medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo.

$C_{oi}$  y  $C_{pi}$  son las precipitaciones observadas y predichas para  $N$  casos.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{pi} - C_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (|C_{pi} - \overline{C_o}| + |C_{oi} - \overline{C_p}|)^2} \quad (18)$$

### 3.6. Resultados estadísticos

#### 3.6.1. Resultados estadísticos para SST

Se estimó el desempeño del modelo por medio de la comparación entre los resultados de las simulaciones con las diferentes configuraciones propuestas. En base a los elementos analizados se calcularon distintos indicadores: Sesgo (BIAS), Probabilidad de detección de éxito (POD), Tasa de falsa alarma (FAR), Probabilidad de detección de falsas alarmas (PODF), Fracción correcta (ACC) y Razón de probabilidades (OR) (Pennelly et al. 2014)

	Valor ideal	ARGENTINA		CHILE		PROMEDIO TOTAL	
		SST_OFF	SST_ON	SST_OFF	SST_ON	SST_OFF	SST_ON
BIAS	1	1.91	1.87	4.28	4.10	3.09	2.99
POD	1	0.76	0.75	0.52	0.54	0.64	0.65
FAR	0	0.61	0.60	0.88	0.86	0.75	0.73
PODF	0	0.41	0.40	0.20	0.19	0.31	0.30
ACC	1	0.63	0.64	0.79	0.80	0.71	0.72
OR	$\infty$	6.00	6.05	6.03	8.76	6.02	7.41

Tabla 5. Resultados de los cálculos estadísticos cualitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, SST\_ON vs SST\_OF

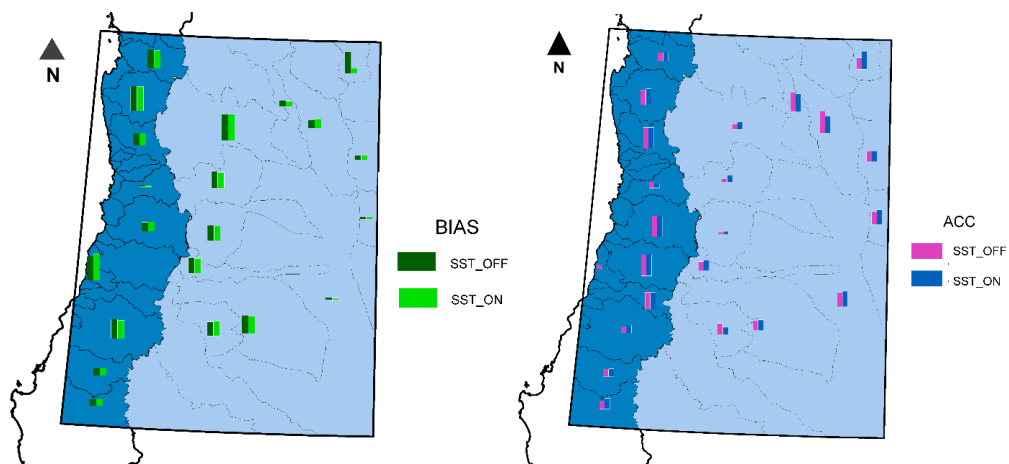


Figura 25. Distribución de parámetros estadísticos cualitativos por cuenca y para ambas configuraciones de WRF, SST\_ON vs. SST.OFF

Una inspección cuidadosa los resultados indica que la mayoría de los eventos predichos y no observados (valores altos de FAR) está en las cuencas más elevadas, que contienen la cordillera, tanto en Argentina como en Chile. De manera opuesta, en ambas configuraciones la fracción de eventos predichos (POD) es mayor en cuencas ubicadas hacia el este del dominio de modelado, en Argentina o en la Zona Central de Chile. Considerando los eventos y no-eventos de forma simétrica, las predicciones en Chile son mejores que en Argentina.

La corrección del BIAS es solamente posible siempre y cuando haya datos observacionales suficientes, lo cual no es el caso de las cuencas elevadas que contienen la cordillera.

La obtención de valores cercanos a 1 partir del cálculo de ACC indica una cantidad de predicciones correctas apropiada sobre el número total de predicciones señaladas por el modelo.

	Unidad	ARGENTINA		CHILE		PROMEDIO TOTAL	
		SST_OFF	SST_ON	SST_OFF	SST_ON	SST_OFF	SST_ON
FAR	%	53.60	54.50	82.20	83.10	67.9	68.8
RMSE	mm	13.32	13.21	1.40	1.37	7.36	7.29
FB	Adim.	-0.69	-0.71	-0.47	-0.45	0.59	0.58
d	Adim.	0.78	0.81	0.95	0.96	0.86	0.88

Tabla 6. Resultados de los cálculos estadísticos cuantitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, SST\_ON vs SST\_OF

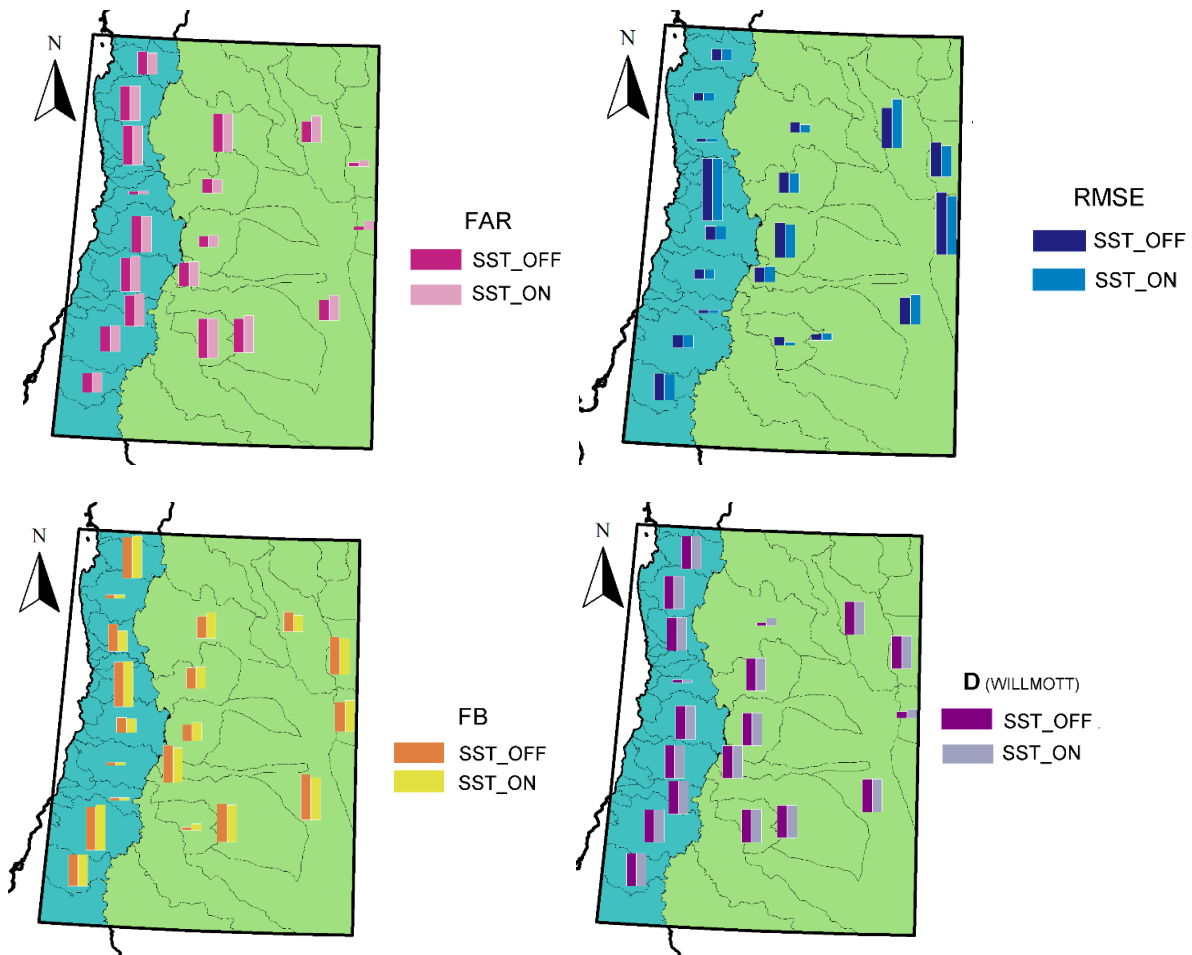


Figura 26. Distribución de parámetros estadísticos cuantitativos por cuenca y para ambas configuraciones de WRF,

A partir del indicador estadístico FAR puede observarse que el uso de SST\_ON en la configuración de WRF, mejora entre el 1% y el 8% la simulación de precipitaciones tanto en las cuencas de Argentina como en las cuencas de Chile. Si bien en las cuencas del este de San Luis los valores obtenidos en el cálculo son menores, debe notarse que el número

de estaciones analizadas es mucho mayor (Ver Figura 13) por lo que debe notarse que hay mayor dispersión de datos. La fracción de predicciones dentro de un factor de 2 de observaciones (FB) es mayor para las cuencas de Chile que para las cuencas de Argentina. No hay diferencias apreciables entre las dos configuraciones. El error medio cuadrático (RMSE) varía desde 0.02 hasta 7.34. Con tales valores mínimo y máximo se distribuye entre las cuencas de la manera que se observa en la Figura 26. Las cuencas que presentan menor desviación son las ubicadas al oeste de la Argentina y región central de Chile, mientras que en las cuencas periféricas del dominio en estudio la desviación es mayor. Para la mayoría de los casos, la configuración SST\_ON presenta un mejor desempeño a la hora del modelado de precipitaciones regionales. El índice de acuerdo de Willmott (D) (Willmott 2012) varía entre 0.6 y 1. El promedio para todas las simulaciones vale 0.88 y casi siempre es mejor para la configuración con SST\_ON. Existe gran diferencia entre las cuencas ubicadas al este y al oeste de la cordillera de Los Andes ( $D = 0.96$  para Chile y  $D = 0.81$  para Argentina). Si bien el índice de acuerdo en Argentina es mucho menor, debe considerarse que el valor de precipitaciones acumuladas en todo el período analizado en Chile es cercano a cero.

Decisión: Puesto que el modelao que incluye SST variable replica mejor las observaciones durante las simulaciones, se decide incorporar a las parametrizaciones los datos de SST diarios. Esto posiblemente es debido a una mejor representación de los flujos de humedad.

### 3.6.2. Resultados estadísticos para los ECP

Se estimó el desempeño del modelo por medio de la comparación entre los resultados de las simulaciones con las diferentes configuraciones propuestas. En base a los elementos analizados se calcularon distintos indicadores: Sesgo (BIAS), Probabilidad de detección de éxito (POD), Tasa de falsa alarma (FAR), Probabilidad de detección de falsas alarmas (PODF), Fracción correcta (ACC) y Razón de probabilidades (OR) (Pennelly et al. 2014).

	Valor ideal	ARGENTINA				CHILE				PROMEDIO TOTAL			
		EXP	KF	BMJ	GD	EXP	KF	BMJ	GD	EXP	KF	BMJ	GD
BIAS	1	1.950	1.904	1.865	1.833	4.064	4.083	3.992	4.055	4.064	4.083	3.992	4.055
POD	1	0.715	0.681	0.703	0.688	0.343	0.381	0.319	0.338	0.343	0.381	0.319	0.338
FAR	0	0.591	0.593	0.589	0.586	0.826	0.821	0.828	0.817	0.826	0.821	0.828	0.817
PODF	0	0.323	0.313	0.314	0.309	0.120	0.124	0.118	0.116	0.120	0.124	0.118	0.116
ACC	1	0.679	0.676	0.686	0.688	0.849	0.846	0.850	0.851	0.849	0.846	0.850	0.851
OR	$\infty$	6.069	5.306	6.335	5.894	8.853	9.777	80782	6.561	8.853	9.777	8.782	6.561

Tabla 7. Resultados de los cálculos estadísticos cualitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, EXP (defecto), KF, BMJ, GD

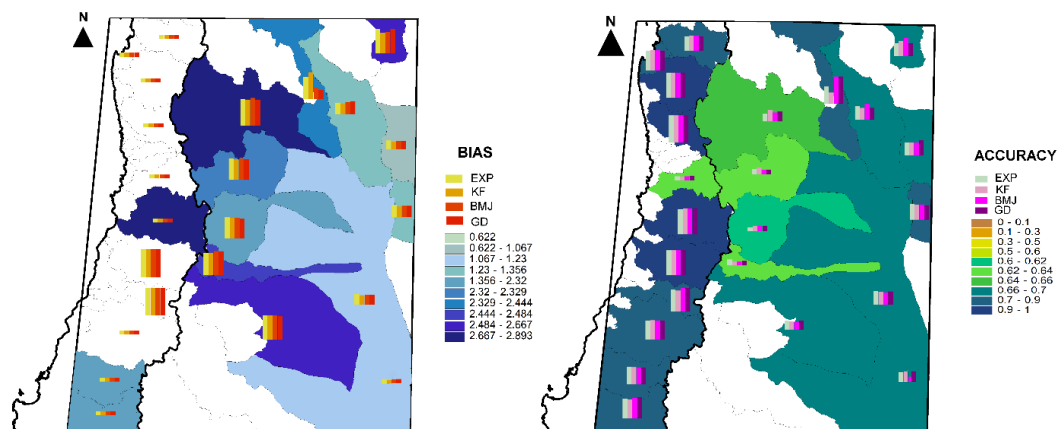


Figura 27. Distribución de parámetros estadísticos cualitativos por cuenca y para las configuraciones de WRF propuestas, EXP (por defecto), KF, BMJ, GD

La probabilidad de detección (POD) es grande, indicando que la predicción es alta para todo el dominio. Debido a que en Argentina la precipitación acumulada para el período de tiempo estudiado y el número de estaciones para extraer datos es más grande, los valores de este estadístico son mayores para todos los ECP respecto a los obtenidos en Chile. Si bien la parametrización sin cúmulos (EXP) presenta mejores resultados, BMJ alcanza valores muy cercanos también. El promedio entre las dos regiones en estudio deja a la parametrización KF como la mejor en la predicción de eventos observados para el área total. En cuanto a la relación respecto a eventos predichos y que no ocurrieron (FAR), la parametrización GD es la que predice la menor cantidad de eventos no observados. GD es la configuración que también predice mejor la ausencia de eventos (PODF), en todo el período de estudio. Valores cercanos a 1 en la fracción de predicciones correctas (ACC) indica un mejor desempeño de las configuraciones en el número total de predicciones dadas por el modelo. En este caso, es la parametrización GD la que presenta mayor cantidad de aciertos. Para el sector chileno, para KF hay menos previsiones erróneas (OR) que para GD. Mientras que en Argentina los aciertos respecto de los errores son similares. En el análisis promedio se repite que KF prediga mejor el evento que GD. En Argentina los valores obtenidos muestran una mejor predicción de eventos respecto a Chile. La parametrización KF presenta valores más cercanos a la perfección.

	Unidad	ARGENTINA				CHILE				PROMEDIO TOTAL			
		EXP	KF	BMJ	GD	EXP	KF	BMJ	GD	EXP	KF	BMJ	GD
FAR	%	54.10	52.61	53.73	55.60	85.50	85.50	85.75	86.24	69.80	69.05	69.74	70.92
RMSE	mm	21.5	14.5	15.52	14.6	0.09	0.06	0.07	0.08	10.8	7.3	7.8	7.4
FB	Adim.	-0.90	-0.62	-0.65	-0.69	-1.32	-1.19	-1.17	-1.31	-1.12	-0.91	-0.91	-1.0
BIAS	mm	2.65	1.90	1.96	2.05	4.92	3.95	3.86	4.81	3.79	2.93	2.90	3.43

Tabla 8. Resultados de los cálculos estadísticos cuantitativos para las diferentes configuraciones de WRF, para los dos países que forman parte del dominio de estudio, EXP (defecto), KF, BMJ, GD



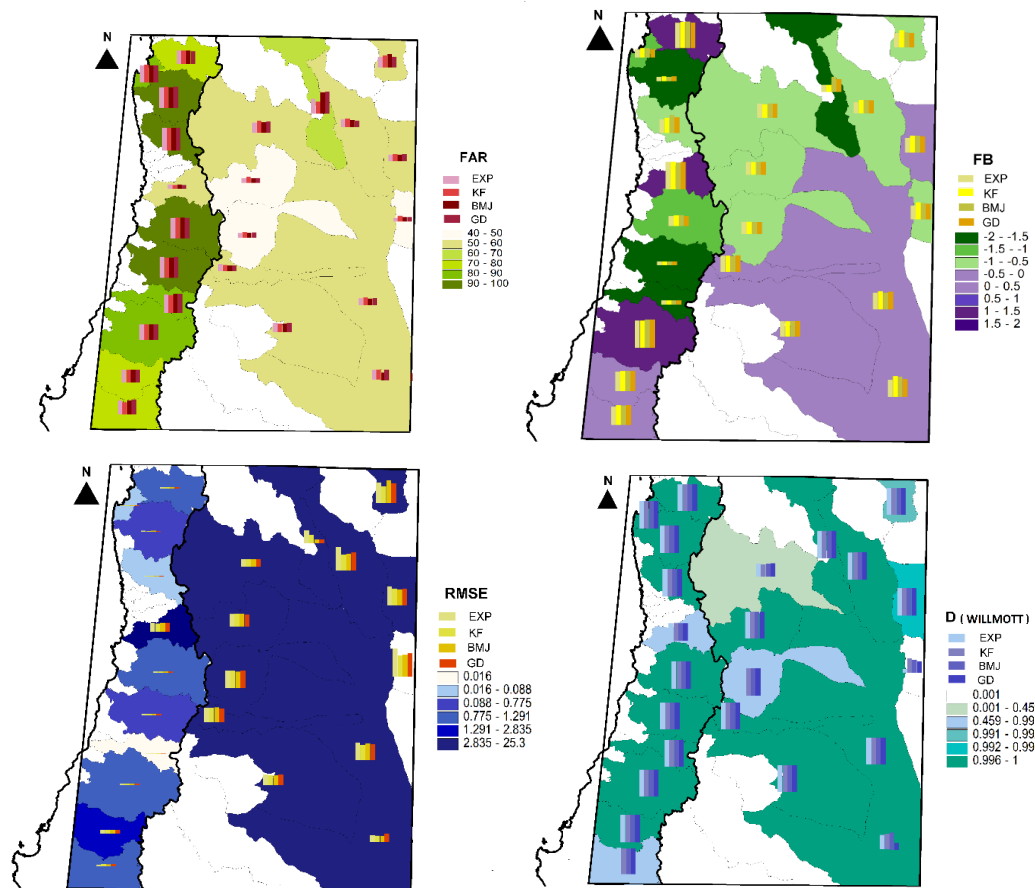


Figura 28. Distribución de parámetros estadísticos cuantitativos por cuenca y para las configuraciones de WRF propuestas, EXP (por defecto), KF, BMJ, GD

La fracción de predicciones dentro de un factor de 2 de observaciones (FAR2) adquiere un mejor valor para la parametrización GD, es la que menos se aleja del valor ideal. De acuerdo a los valores obtenidos para (FB) puede observarse que los valores negativos indican que para todos los casos el modelo sobrestima cantidades de precipitación acumulada, pero es GD la configuración que mejor realiza la predicción.

El error medio cuadrático (RMSE) indica que hay mayor variabilidad de las predicciones en la Argentina siendo KF la configuración que mejor se desempeña.

Los resultados obtenidos a partir del cálculo de los parámetros estadísticos indican que la mayoría de los eventos predichos y no observados (valores altos de FAR) está en las cuencas más elevadas, que

Contienen la cordillera, tanto en Argentina como en Chile, siendo más notoria la variación en el sector chileno en la Cuenca Río Maipo, Cuenca Río Rapel, Cuenca Río Mataquito y Cuenca Río Maule entre otras. En cuanto al error medio cuadrático (RMSE) se observa mayor variabilidad en los valores obtenidos entre cuencas. Esto puede atribuirse a que el número de estaciones con datos medidos y la precipitación acumulada es mayor hacia el este. Por lo tanto, el modelo muestra un mejor desempeño hacia las cuencas de este sector del dominio. Cerca de la cordillera, el comportamiento de los diferentes ECP es bastante similar. Considerando los eventos y no-eventos de forma simétrica, las predicciones en Chile son mejores que en Argentina. La precipitación acumulada en el vecino país para los períodos de tiempo en estudio es menor que en Argentina.

La obtención de valores cercanos a 1 partir del cálculo de ACC indica una cantidad de predicciones correctas apropiada sobre el número total de predicciones señaladas por el modelo principalmente hacia el este del dominio.

Decisión: Puesto que las configuraciones KF y GD exhiben resultados similares, pero GD es la parametrización que respresenta mejor las cantidades de precipitación acumulada, se decide emplear configuración para las pruebas de los distintos escenarios con WRF-Chem.

### 3.7. Implementación del modelo acoplado con química WRF-Chem

El modelo WRF-Chem incluye interacciones en línea entre aerosoles, radiación, nubes y precipitación para efectos directos, indirectos y/o semidirectos de aerosoles como se describe en (Fast et al., 2006), (Chapman et al., 2009), (Gustafson et al., 2007) y (Yang et al., 2011).

Para la segunda instancia de este estudio con modelado, esta vez se trabajó con el modelo acoplado con química y se obtuvieron los primeros avances en el conocimiento de la relación entre aerosoles y precipitaciones.

En este caso, los análisis se realizaron para observar modificaciones generadas por los aerosoles tanto a escala global (dominio\_d01 completo) como escala local (provincia de Mendoza).

#### 3.7.1. Esquema de aerosol MOSAIC

El modelo para simular interacciones y química de aerosol, 'Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry' (MOSAIC) proporcionó un tratamiento integrado de los procesos químicos y microfísicos en aerosol. Éste es el modelo más activamente desarrollado y recomendado (Zaveri, 2008) para utilizar en WRF-Chem.

En este estudio utilizamos 4 contenedores, correspondientes a los rangos de partículas de diámetro seco de 0.039-0.156, 0.156-0.624, 0.624-2.5 y 2.5-10.0 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), respectivamente. Las partículas dentro de los contenedores de cada tamaño se asume que se mezclan internamente, de modo que todas las partículas dentro de un contenedor tienen la misma composición química (Yang et al., 2018).

Con MOSAIC se pueden analizar interacciones de los aerosoles con la radiación y con las nubes para determinar tamaño y número de gotas formadas.

La composición de aerosoles está dada principalmente por: sulfatos, nitratos, amonio, sal marina, carbonatos, calcio, black carbón, organic carbón, minerales, metales traza y otros inorgánicos.

#### 3.7.2. Esquema de gas CBM-Z

La química de la fase gaseosa se simuló con el mecanismo Carbon-Bond Mechanism (CBM-Z) (Zaveri & Peters, 1999).

#### 3.7.3. Introducción de inventarios de alta resolución al modelo

El modelo global Model for Ozone and Related Chemical Tracers, versión 4 (MOZART-4) (Emmons et al., 2010) se usó como condiciones iniciales y de contorno (IC / BC).

Como inventario global, se utilizaron los datos de la base de datos de emisiones de la investigación atmosférica mundial 'EDGAR' (Olivier et al., 2002).

La introducción de inventarios de emisiones de alta resolución propios (Cremades et al., 2011)( Puliafito et al., 2011) (Puliafito et al. 2015) (Allende et al. 2016) (Puliafito et al. 2017) en el modelo WRF-Chem permitió una representación espacio-temporal más detallada de los perfiles de variabilidad temporal tanto regional como global (diurno, mensual y estacional).

Tanto la calidad de las condiciones iniciales y de contorno (IC/BC), como la resolución temporal y espacial del inventario de emisiones considerado, juegan un papel clave en la representación apropiada de eventos de contaminación en los modelos de calidad de aire (Fernandez et al., 2010) (Fernandez et al. 2014). Para investigar el impacto de la distribución espacial y temporal de diferentes emisiones antropogénicas en la calidad del aire de fondo (background) en regiones de topografía compleja utilizando WRF-Chem, se adaptó la herramienta de preprocesamiento anthro\_emiss para incluir emisiones de alta resolución acopladas a campos IC/BC mejorados (Lopez Noreña et al., 2018) (Schiavone et al., 2018).

Gg 2014	TRANSP.	PROD. ENERGÍA	RESID+ COMER+ IND. PEQ	GESTION ESTIERCOL	AGRICULTURA	FUEGO (AWB)	BASURA	TOTAL
CH4	19.41	190.44	7.11	2,647.31	30.05	31.24	581.35	3,506.91
PM2.5	11.36	76.73	96.36	11.14	2.06	52.85	-	250.50
SO2	21.40	49.69	36.33	-	-	1.28	-	108.70
NOX	481.97	210.35	134.63	6.85	10.32	5.52	-	849.63
CO	1,750.67	33.16	490.21	-	-	498.40	-	2,772.43
N2O	4.44	1.24	0.63	79.44	34.04	0.63	-	120.41
PM10	11.52	77.90	96.36	23.86	2.06	15.64	-	227.35
VOC	370.37	84.42	20.33	294.18	13.76	5.65	-	788.71
NH3	3.26	0.03	3.69	180.51	159.48	6.16	-	353.12
CO2	53,572	47,781	52,530	-	349	6,432	-	160,665

Tabla 9. Tabla4. Emisiones de todos los sectores para Argentina 2014 (Gg)  
Fuente: (Puliafito et al. 2015) (Puliafito et al. 2017)

Los inventarios de emisiones introducidos, mostraron coherencia con los valores de superficie y distribución espacial obtenida. Sin embargo, a la hora de introducir las IC/BC desde archivos de background químico, a través de la herramienta mozbc, se observó que la concentración ambiente de fondo y la distribución espacial son inconsistentes con los valores reportados en los modelos globales.

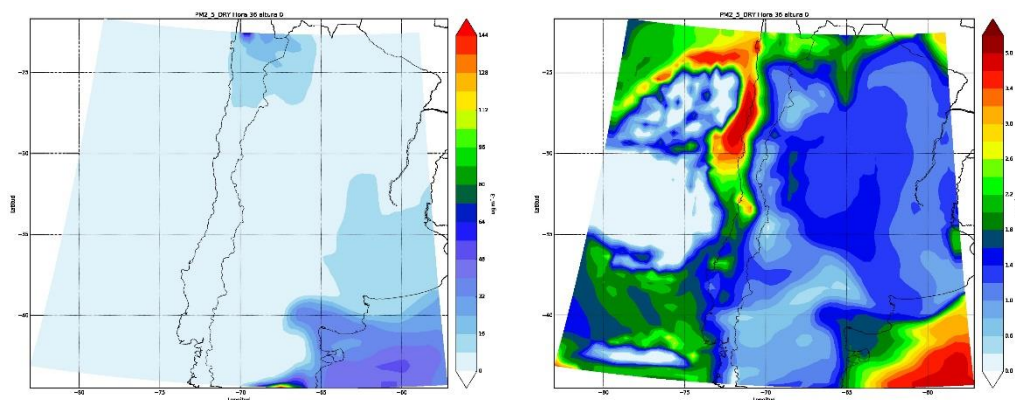


Figura 29. Distribución Espacial de PM2.5 para la (a) simulación por defecto y la (b) simulación con emisiones y IC/BC en alta resolución

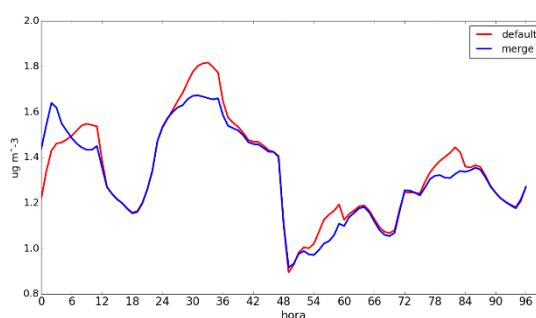


Figura 30. Concentraciones de fondo de PM2.5 para la simulación por defecto en rojo y la optimizada en azul

Al analizar las salidas obtenidas para material particulado PM2.5 se descubrió que el modelo mozbc considera una contribución muy elevada de aerosol marino en los valores de PM2.5 de fondo, por lo cual se decidió anular dicha contribución al generar las IC/BC. Los resultados revelaron diferencias considerables entre ambos inventarios así como la importancia de mejorar los datos de entrada como condiciones de borde para América del Sur, los cuales en muchos casos no han sido correctamente validados en modelos globales.

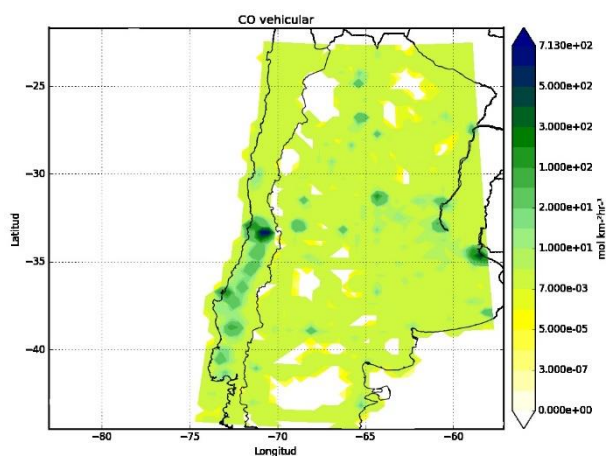


Figura 31. Entrada para WRF-Chem: Inventario de CO-sector transporte con ambos inventarios unificados, EDGAR (global) y GEAA (regional)

### 3.8. Estudio de situación local: Precipitaciones en Mendoza

#### 3.8.1. Estaciones meteorológicas

Se organizó una base de datos con registros diarios de lluvia en la provincia de Mendoza, con un total de 51 estaciones meteorológicas. No todos los datos encontrados fueron útiles para llevar a cabo una comparación durante un período de tiempo de longitud considerable. Es por esto, que se aplicó un método de filtrado y se seleccionaron aquellas estaciones con sólo el 30% de datos faltantes en la serie de tiempo a analizar. La base de datos final consiste en observaciones de precipitaciones diarias de 26 estaciones (ver Tabla 10 y Figura 32) con mediciones completas durante el período 1983-2013.

<i>MET-STATION</i>	<i>ID</i>	<i>LAT (°S)</i>	<i>LONG (°W)</i>
<i>Capitán Montoya</i>	p1	34,582	68,450
<i>El Nihuil</i>	p2	35,033	68,676
<i>La Angostura</i>	p3	35,099	68,873
<i>Loma Negra</i>	p4	35,264	69,248
<i>Las Malvinas</i>	p5	34,945	68,243
<i>Las Salinas</i>	p6	34,931	68,805
<i>Rama Caída</i>	p7	34,669	68,386
<i>San Rafael</i>	p8	34,612	68,316
<i>Villa Atuel</i>	p9	34,823	67,921
<i>Los Mayines</i>	p10	35,720	70,176
<i>Arroyo La Vaina</i>	p11	35,919	69,989
<i>Las Vertientes</i>	p12	34,423	68,603
<i>Puesto Carmona</i>	p13	34,679	67,841
<i>Puesto La Mora</i>	p14	35,122	66,850
<i>Arroyo Hondo</i>	p15	34,478	69,286
<i>Las Aucas</i>	p16	34,701	69,535
<i>La Consulta</i>	p17	33,730	69,120
<i>Uspallata</i>	p18	32,591	69,347
<i>San Carlos</i>	p19	34,034	69,192
<i>San Martín</i>	p20	33,081	68,467
<i>Mza Aero</i>	p21	32,829	68,798
<i>Crycit</i>	p22	32,896	68,875
<i>Chacras de Coria</i>	p23	32,982	68,876
<i>Malargüe</i>	p24	35,480	69,578
<i>Santa Rosa</i>	p25	33,711	67,950
<i>Rivadavia</i>	p26	33,195	68,463

Tabla 10. Características geográficas de las estaciones meteorológicas analizadas en el período 1983-2013

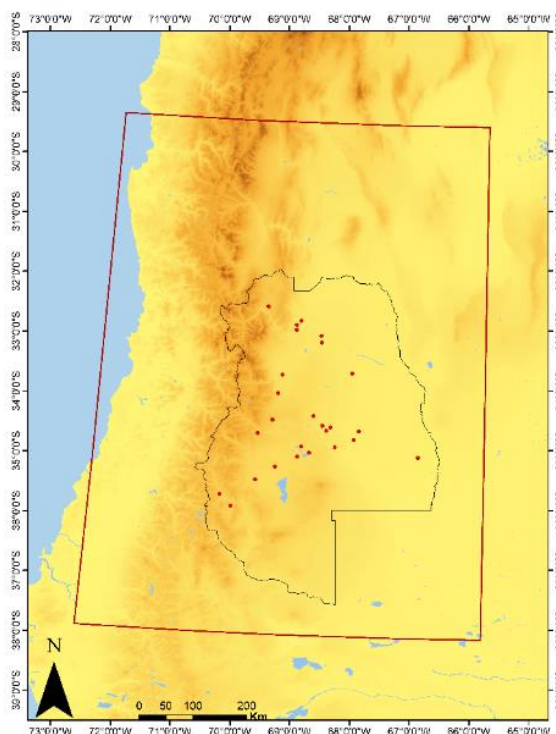


Figura 32. Zoom Figura 13, provincia de Mendoza en el dominio pequeño d03.  
Ubicación de las estaciones meteorológicas (puntos rojos)

Las estimaciones de precipitaciones en áreas montañosas, con topografía compleja, a menudo están sujetas a grandes incertidumbres debido a la falta de accesibilidad a los pluviómetros. Estos pluviómetros, generalmente tienen una distribución desigual y dispersa, un área de muestra limitada y altos costos de mantenimiento (Rivera et al., 2018).

Para un análisis de la distribución espacial de la precipitación en un terreno extremadamente complejo, es necesario tener una red de observaciones lo suficientemente densa, pero esta es realmente una limitación importante en Los Andes, en relación con otras cadenas montañosas del mundo (Viale and Nuñez, 2011). Por lo tanto, la base de datos seleccionada para el análisis de precipitaciones en la provincia de Mendoza constituye la mejor red disponible del área.

### 3.8.2. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

El algoritmo TRMM 3B42\_daily (Huffman et al., 2007) produce estimaciones de precipitación en mm ajustadas por un método combinado de TRMM-IR. Los datos de precipitación y las estimaciones de error se presentan con una resolución de datos temporales diarios, y  $0.25 \times 0.25^\circ$  de resolución espacial. La cobertura total se extiende desde  $50^\circ$  Latitud Norte hasta  $50^\circ$  Latitud Sur.

Los datos obtenidos de este producto, fueron utilizados para analizar puntos en el mapa, en los que no has estaciones meteorológicas fijas.

### 3.8.3. Aerosoles atmosféricos

El AOD es la medida de los aerosoles distribuidos dentro de una columna de aire desde el instrumento (superficie de la tierra) hasta la parte superior de la atmósfera. MERRA-2 es un reanálisis atmosférico de la NASA que comienza en 1980 y proporciona

diagnósticos de aerosoles extendidos con resolución temporal mensual y  $0.25 \times 0.65^\circ$  de resolución espacial (Randles, 2017).

El producto de dispersión de MERRA, Scattering aerosol optical depth AOD 550 nm, fue utilizado como un proxy para AOD, ya que la serie de dispersión fue más larga para el período 1983-2013 que los datos de AOD disponibles.

#### 3.8.4. Precipitación vs. AOD

Los estudios de precipitación a gran escala, indican que en América Latina ha habido un aumento en la precipitación que ha afectado las actividades agrícolas, (Aguilar et al., 2005) (Viale & Norte, 2009) (Viale and Nuñez, 2011) (Agosta & Cavagnaro, 2014) (Marengo, 2014) (de la Torre et al., 2015) (Santos et al., 2015) (Rivera et al., 2018) se refieren a las precipitaciones en nuestra área de estudio.

Los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas y de TRMM se analizaron para extensas series de tiempo. Ambas bases de datos presentaron comportamientos similares para las mismas estaciones, con cierta subestimación del TRMM con respecto a las mediciones en tierra.

Las Figuras 33 y 34 muestran las series de tiempo anuales para el período 1983-2013 y la precipitación mensual durante el 2013 de las principales estaciones meteorológicas observadas.

A través de los análisis de tendencia y estacionalidad de la precipitación, aplicados sobre la provincia de Mendoza, se puede observar un ligero aumento en la tendencia de precipitación anual durante el período de estudio (1983-2013) para la mayoría de las estaciones. Las precipitaciones lluviosas de Mendoza presentan un comportamiento estacional, con valores máximos durante el verano que disminuyen durante otoño y primavera, y los inviernos son prácticamente secos.

Los meses de verano (diciembre – enero – febrero) son el período con los registros de precipitación más altos, por lo tanto, se realizó un análisis de correlación entre la precipitación anual acumulada de verano y los valores promedio de dispersión AOD 550 nm para los mismos períodos.

Habiendo analizado combinaciones entre datos satelitales y observaciones terrestres, la mayoría de los puntos estudiados se vieron relacionados con un valor de correlación positivo pequeño. Para tener un análisis más preciso, se tomó el mes central de la temporada (enero), y se llevó a cabo el mismo procedimiento. En este mes, los comportamientos pudieron identificarse mejor ya que hay más información, y cada año llueven cantidades significativas.

Los valores de correlación obtenidos para este caso varían entre 0.3 y 0.4. Esto confirmaría la posible existencia de algún tipo de relación entre ambas variables.

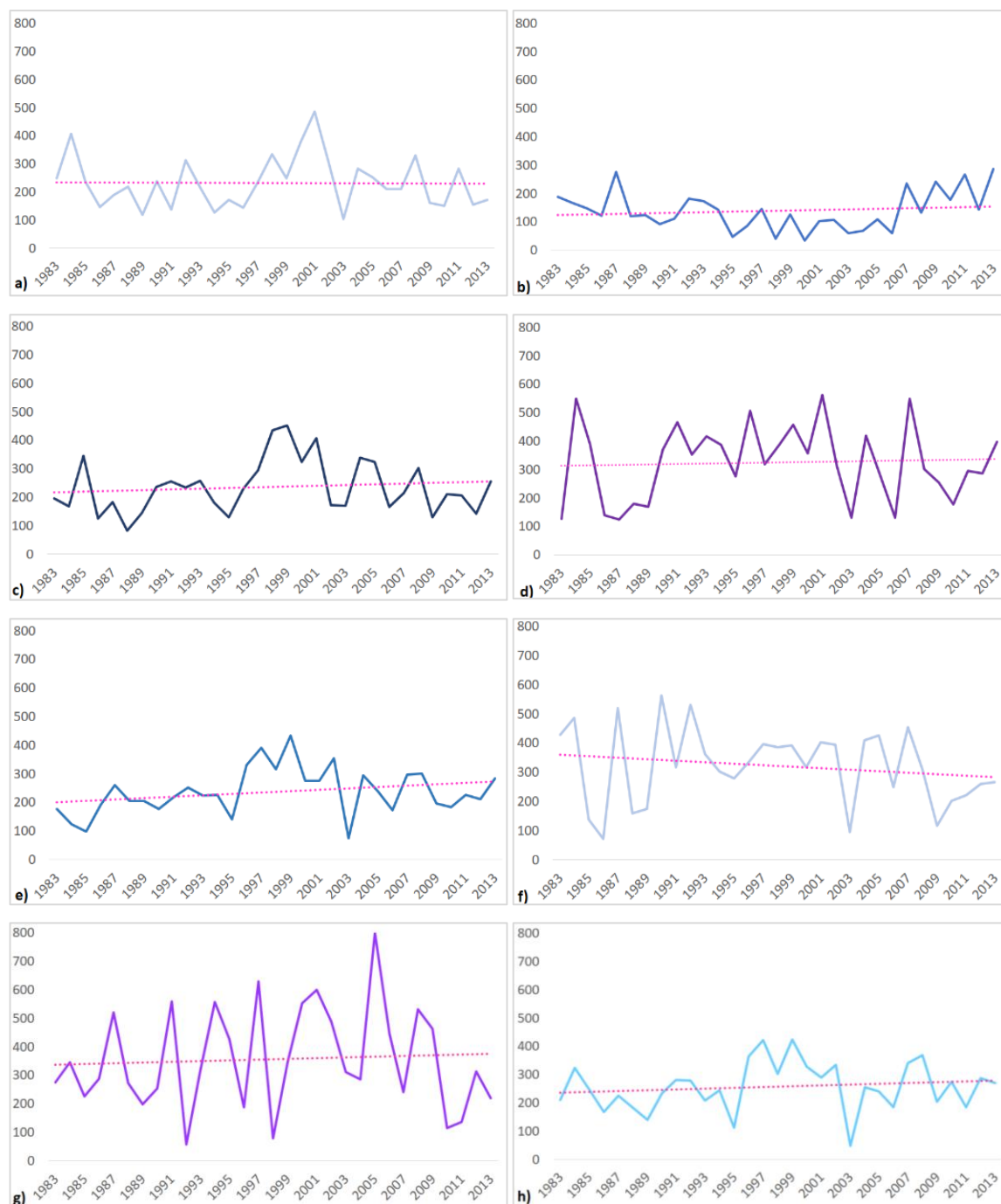


Figura 33. Precipitación anual en Mendoza de 1983 a 2013

Los gráficos son representativos de algunas estaciones: (a)Mza Aero, (b) Uspallata, (c) San Martín, (d) Rama

Caída, (e) La Angostura, (f) La Consulta, (g) Arroyo La Vaina, (h) El Nihuil

p21, p18, p20, p7, p3, p17, p11 y p2 en la Tabla 10

Base de datos: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) – Agencia de Recursos Hídricos (SSRH)





Figura 34. Precipitaciones mensuales en Mendoza durante 2013  
 Los gráficos son representativos de algunas estaciones: (a)Mza Aero, (b) Uspallata, (c) San Martín, (d) Rama Caída, (e) La Angostura, (f) La Consulta, (g) Arroyo La Vaina, (h) El Nihuil  
 p21, p18, p20, p7, p3, p17, p11 y p2 en la Tabla 10  
 Base de datos: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) – Agencia de Recursos Hídricos (SSRH)

### 3.9. Simulación de un evento de precipitación

Luego de observar a través de las estadísticas la posible relación entre las variables, principalmente durante el verano, se seleccionó un evento de lluvia ordinario del 26 al 30 de enero de 2013 para realizar simulaciones con WRF-Chem. El verano es la estación más lluviosa. En ella se pueden identificar mejor los comportamientos porque hay más

información, llueve todos los años en esta estación y no hay un solo año en el que no se registren precipitaciones.

Se realizaron varias ejecuciones del modelo para este evento en particular, utilizando las mismas opciones de configuración indicadas en la Tabla 1 para todas ellas.

En este estudio, nos centramos en el dominio más grande d01, la principal diferencia entre corridas son las cantidades de aerosol inyectadas al modelo.

### 3.9.1. Condiciones atmosféricas

#### 3.9.1.1. Condiciones atmosféricas para el mes de enero de 2013

La Figura 35 muestra las composiciones de anomalías de temperatura en superficie (1000mb) entre el mes de enero de 2013 y la media climatológica del intervalo de los años 1981-2010 construida a partir de Earth System Research Laboratory of National Oceanic and Atmospheric Administration (ESRL-NOAA).

De acuerdo a esto, se evidencian anomalías levemente positivas ubicadas aproximadamente en  $35^{\circ}\text{S}$ ,  $67^{\circ}\text{O}$ , y anomalías negativas ubicadas más hacia el norte y al oeste de Argentina.

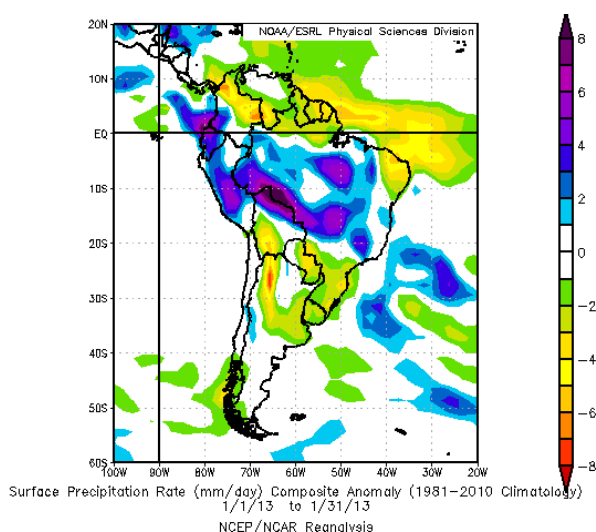


Figura 35. Composición de anomalía de precipitación en superficie entre el mes de enero de 2013 y la media climatológica del intervalo de años 1981-2010

Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL-NOAA, Boulder-Colorado

La Figura 36 se observan los promedios de precipitación superficial para el mes de enero de 2013 dividido en las dos quincenas. Aquí podemos ver, que entre el 15 y el 30 de enero de 2013 el promedio de precipitación fue aproximadamente 4mm alrededor del punto  $35^{\circ}\text{S}$ ,  $67^{\circ}\text{O}$ .

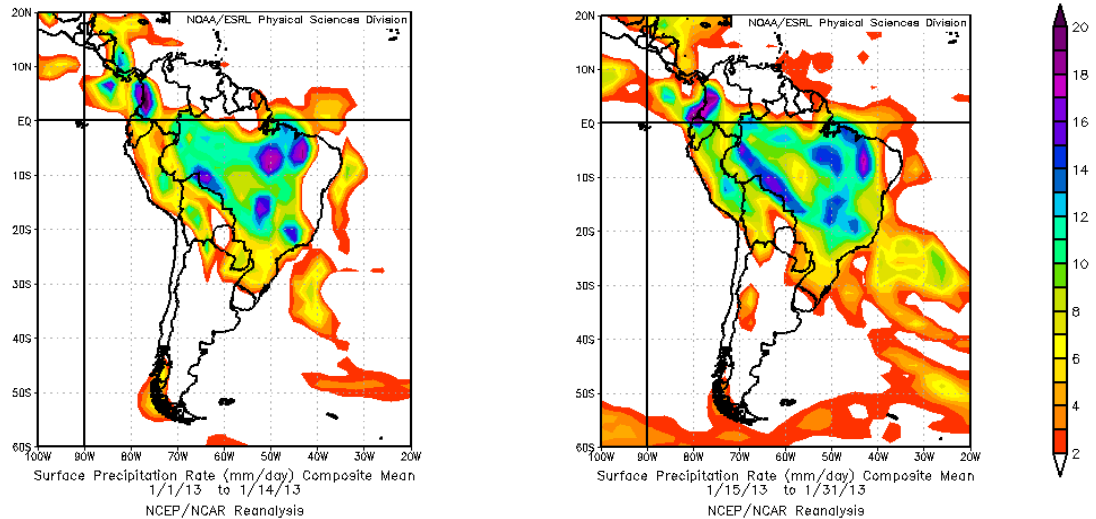


Figura 36. Promedio de las precipitaciones para (a) primera quincena del mes de enero de 2013 y (b) segunda quincena del mes de enero de 2013

Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL-NOAA, Boulder-Colorado

La Figura 37 muestra la intensidad media del viento para el mes de enero de 2013. Puede observarse que superficialmente (1000 mb) los vientos sobre Argentina tienen una velocidad media de aproximadamente 4km/h con direcciones promedio provenientes del sector N-NE. Mientras que el mismo análisis en altura, a 500 mb, indica vientos promedio provenientes del O con una velocidad media aproximada de 10km/h.

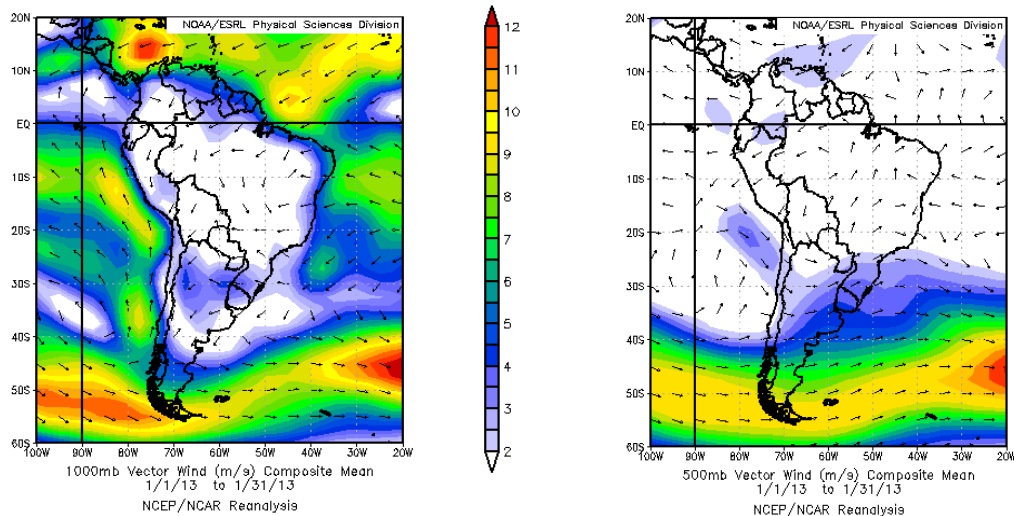


Figura 37. Promedio de las velocidades (escala de colores) y la dirección del viento (flechas) para el mes de enero de 2013 (a) en superficie, 1000 mb y (b) en altura, 500 mb

Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL-NOAA, Boulder-Colorado

A continuación, la Figura 38 muestra los promedios de temperatura del aire en superficie y en altura para la primera quincena del mes de enero de 2013. Como puede observarse, los promedios están expresados en grados Kelvin, por lo que en superficie las temperaturas del aire promedio van desde aproximadamente los 27°C al Norte y disminuyendo hacia el sur del país hasta los 18°C. En altura, los valores disminuyen hasta alcanzar valores negativos en la escala de Celsius.

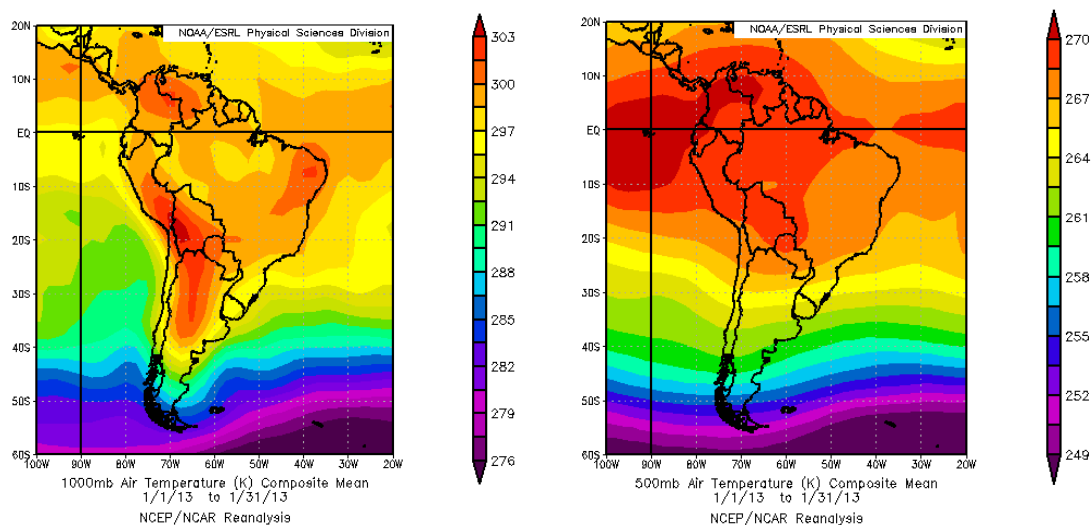


Figura 38. Promedio de la temperatura del aire para el mes de enero de 2013 (a) en superficie, 1000 mb y (b) en altura, 500 mb

Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL-NOAA, Boulder-Colorado

### 3.9.1.2. Condiciones atmosféricas para el evento comprendido entre el 26 y el 30 de enero de 2013

Del conjunto de datos en donde hubo precipitaciones registradas durante el mes de enero, se ha elegido evaluar el evento de 4 días comprendido entre el 26 y 30 de enero de 2013 debido a que en esta fecha las anomalías no son significativas y las condiciones atmosféricas son normales, no se visualizan situaciones extremas ante el análisis de las principales variables meteorológicas.

Según seguimiento de información satelital proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional, sobre Cuyo se desarrollaban algunas áreas de nubosidad de tipo convectiva, dando lugar a tiempo inestable sobre sur y centro de Mendoza, sur y centro de San Luis.



Figura 39. Seguimiento del evento ocurrido entre el 26 y el 30 de enero de 2013 a través de las imágenes satélite GOES 13 - SMN (Meteorológico Nacional)

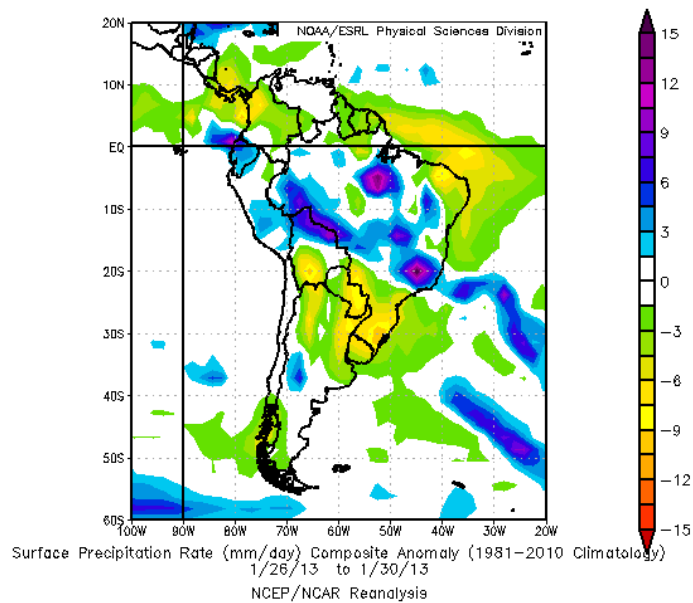


Figura 40. Composición de anomalía de precipitación en superficie para el evento comprendido entre los días 26 y 30 del mes de enero de 2013 y la media climatológica del intervalo de años 1981-2010  
Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL - NOAA, Boulder-Colorado

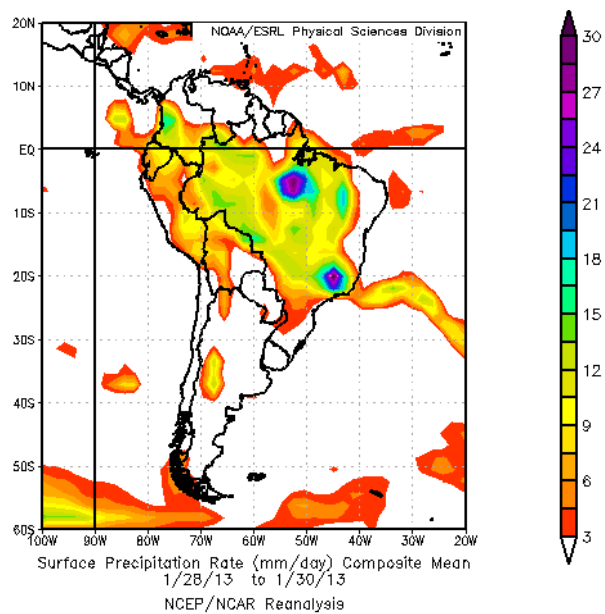


Figura 41. Promedio de las precipitaciones para el evento comprendido entre los días 26 y 30 del mes de enero de 2013  
Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL-NOAA, Boulder-Colorado

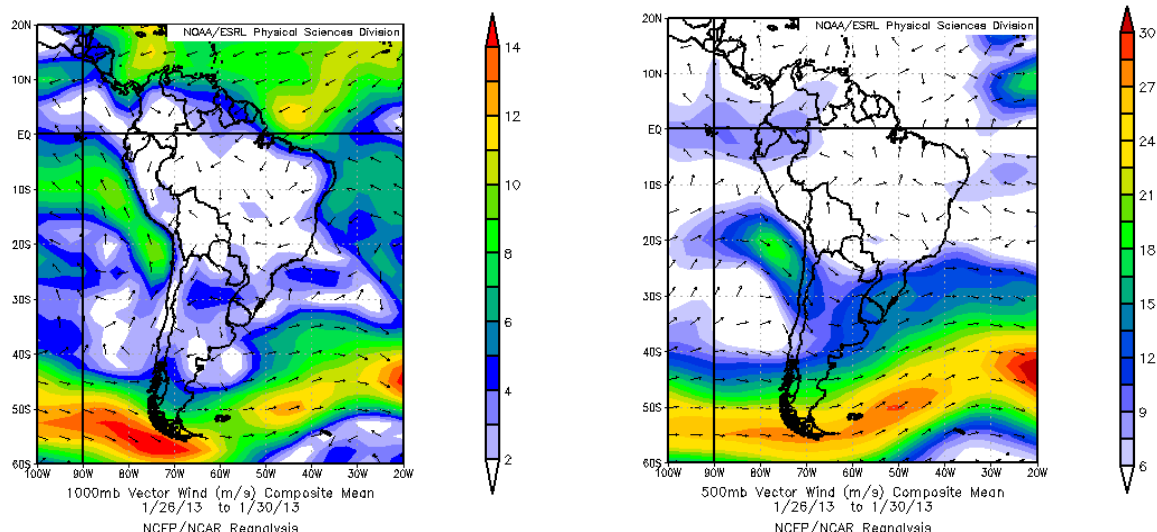


Figura 42. Promedio de las velocidades (escala de colores) y la dirección del viento (flechas) para el evento ocurrido entre los días 26 y 30 del mes de enero de 2013 (a) en superficie, 1000 mb y (b) en altura, 500 mb  
Figura construida a partir de imágenes proporcionadas por ESRL-NOAA, Boulder-Colorado

### 3.9.2. Escenarios propuestos para la simulación del evento

Se plantearon diferentes escenarios: un escenario con química desactivada (OFF\_Q) y un segundo escenario con la química activada (ON\_Q) que incluye emisiones globales de EDGAR (Olivier et al., 2002) y emisiones regionales obtenidas de los inventarios producidos por el Grupo GEAA (Cremades et al., 2011)( Puliafito et al., 2011) (Puliafito et al. 2015) (Allende et al. 2016) (Puliafito et al. 2017).

La Figura 43 muestra la precipitación acumulada en mm para el evento propuesto, para los dos primeros escenarios descriptos.

Se propusieron dos escenarios más, para estudiar el impacto generado sobre las cantidades de precipitación debido a un aumento en la concentración de emisiones. Un tercer escenario con mayor química, en dónde se consideró una pequeña área del dominio (36x36km) y las emisiones se multiplicaron por un factor de 1000 (ON\_Qx1000ch). Y un cuarto escenario, también con un aumento de química pero en este caso en un área bien amplia (100x100km) que se afectó en un factor extremo de 10000 (ON\_Qx10000). Las áreas modificadas, se muestran en los cuadros rojos de la Figura 43.b. Esto podría simular incendios grandes, por ejemplo, en el área centro de la provincia. El cuadro verde señala la escala local, que es la provincia de Mendoza.

La Figura 44 muestra los resultados de la precipitación acumulada en mm para el evento propuesto, obtenidos a partir de los escenarios planteados con incrementos sobre la química.

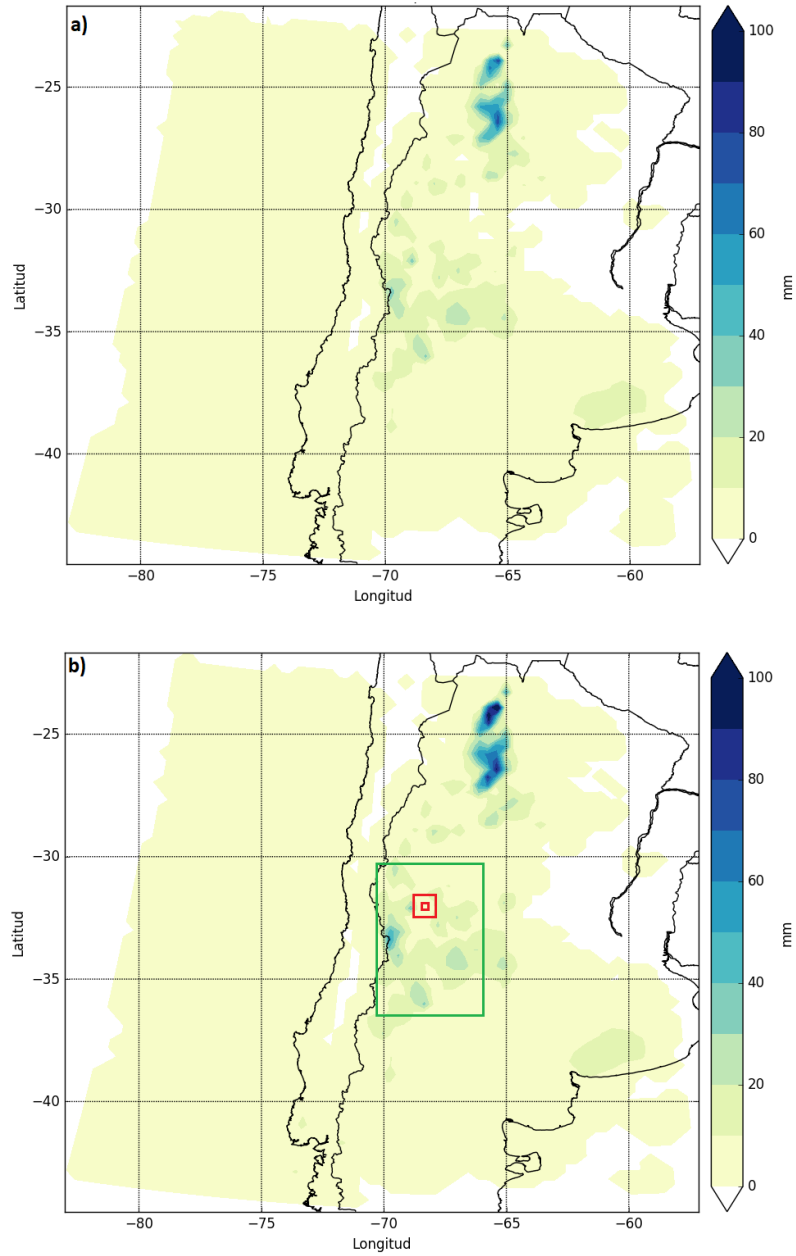


Figura 43. Precipitación acumulada (mm) en el período comprendido entre el 26/01/2013 y el 30/01/2013 (a) Escenario sin química, OFF\_Q, (b) Escenario con química, ON\_Q

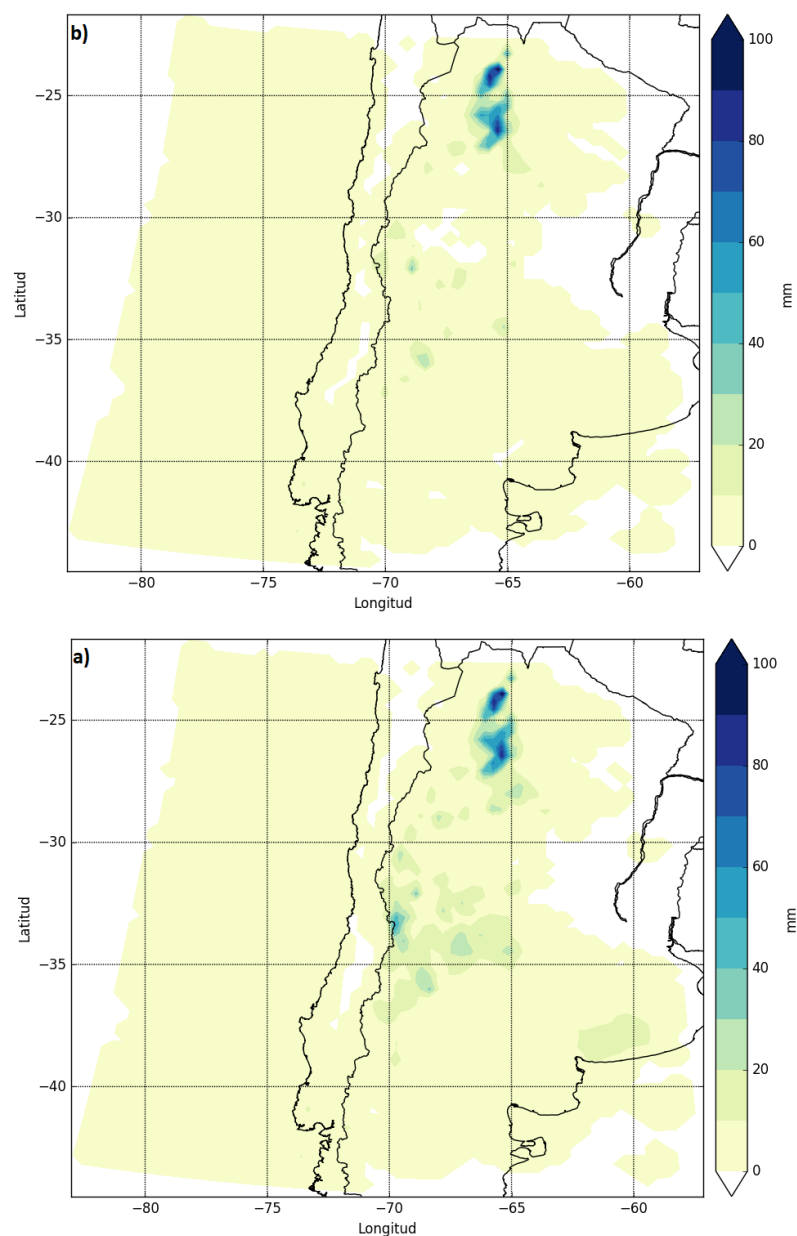


Figura 44. Precipitación acumulada (mm) en el período comprendido entre el 26/01/2013 y el 30/01/2013 para los escenarios con química incrementada (a) con química x 1000, ON\_Qx1000ch área pequeña 36x36km, (b) con química x 10000, ON\_Qx10000 área grande 100x100km

La Figura 45 ilustra los resultados para la concentración ambiental ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de partículas con un diámetro inferior a 2.5 micrómetros (PM 2.5), resaltando la diferencia entre la simulación con las concentraciones del inventario regional de emisiones (ON\_Q) y la simulación con las concentraciones aumentadas por un factor de 10000 (ON\_Qx10000).



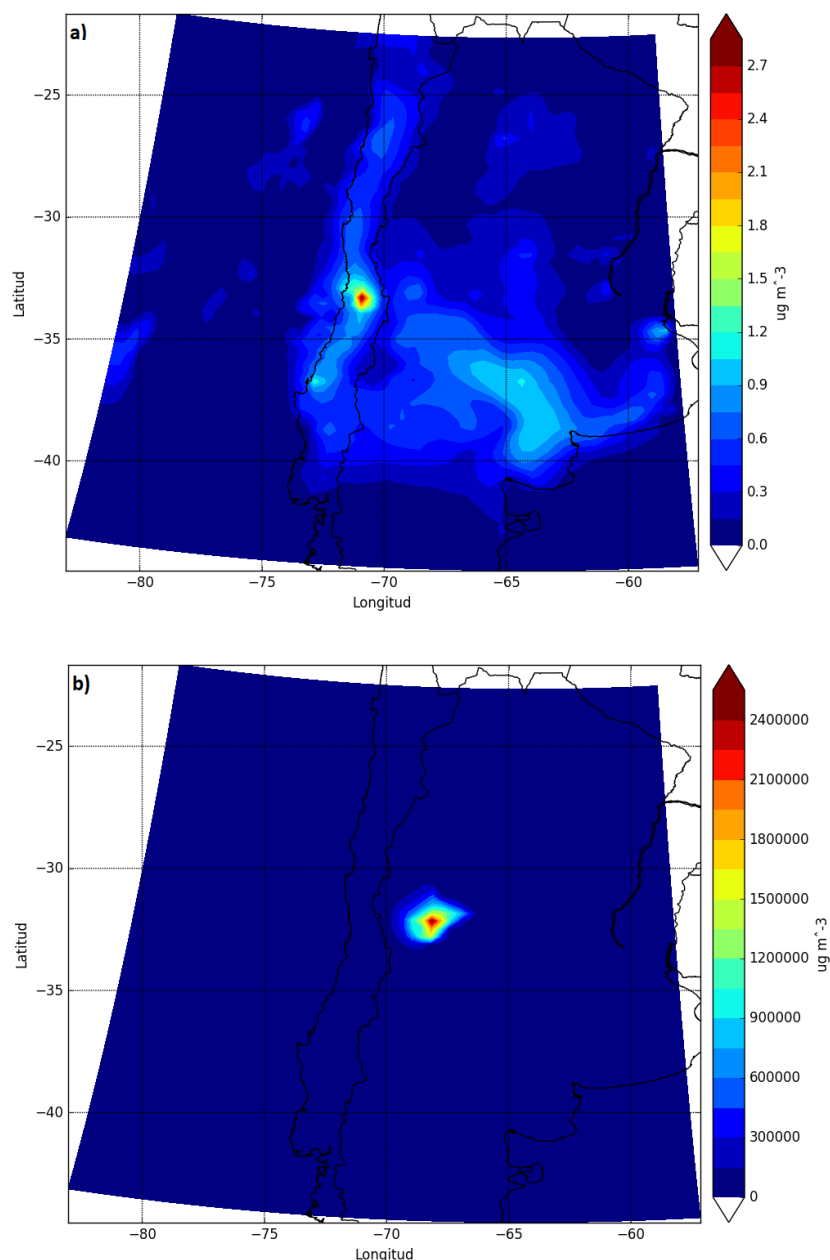


Figura 45. Distribución espacial y concentración de PM 2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en el período desde el 26/01/2013 hasta el 30/01/2013 (a) con química ON\_Q, (b) con química incrementada ON\_Qx10000

Se propusieron también, eventos que no fueran tan extremos proponiendo tres escenarios más que son: el primero con un área de 100x100 km afectada por un factor de 100 (ON\_Qx100), un área mayor a la simulada anteriormente, de 100x100 km incrementada en 1000 (ON\_Qx1000G) y un último escenario con la química incrementada en un factor de 5000 (ON\_Qx5000).

El área de incremento está ubicada en la misma posición que en los escenarios anteriores, como se muestra en la Figura 43.b.

Los resultados de la modelación se muestran en la Figura 46 y las diferencias entre escenarios en la Figura 47.

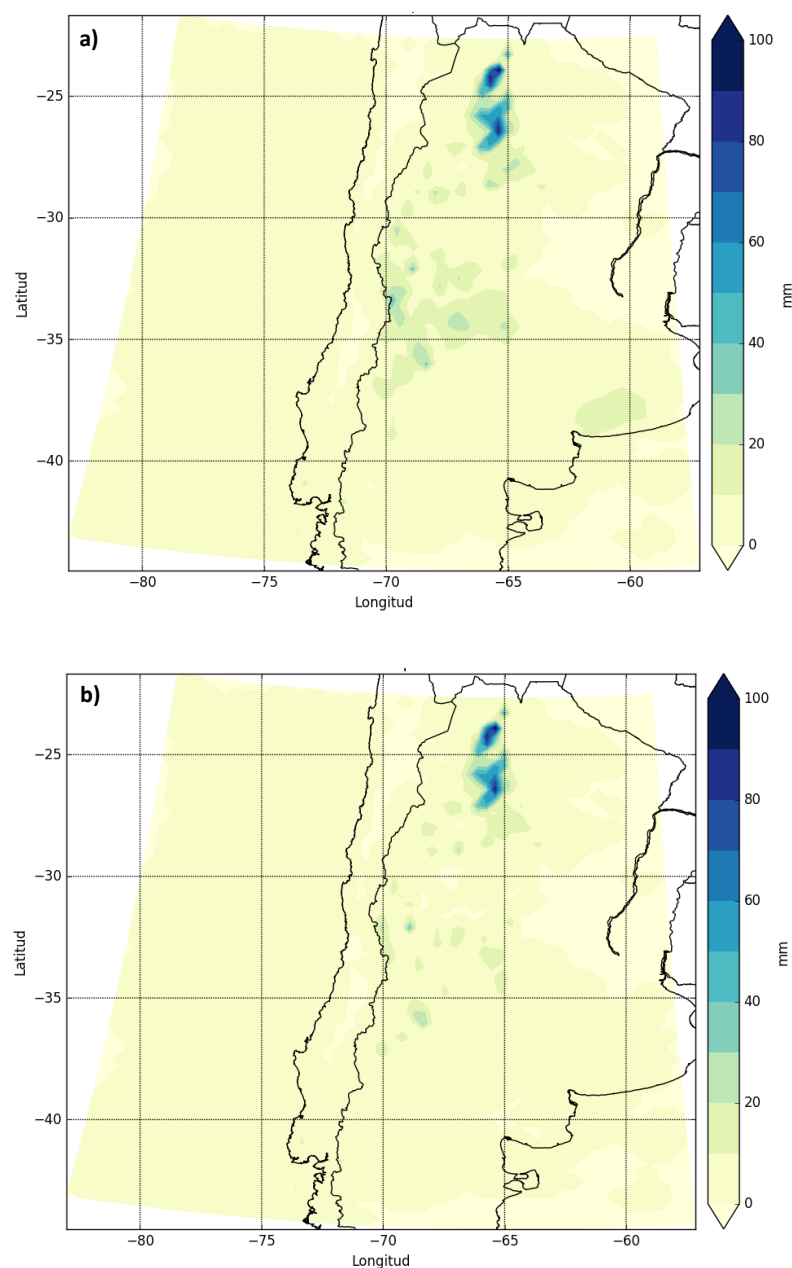


Figura 46. Precipitación acumulada (mm) en el período comprendido entre el 26/01/2013 y el 30/01/2013 para los escenarios con química incrementada (a) con química x 100, ON\_Qx100 área 100x100km, (b) con química x 5000, ON\_Qx5000 área 100x100km

### 3.10. Resultados: Aerosoles vs. precipitaciones con WRF-Chem

Los resultados obtenidos de las simulaciones, indican que existe una influencia de los aerosoles sobre las precipitaciones. Esta influencia afecta en mayor o menor grado, dependiendo de la concentración de los aerosoles dispersos en la atmósfera.

El modelo es sensible a las partículas de aerosol y responde a variaciones generalizadas en la química, tanto a nivel regional como a nivel local.

En una primera etapa de simulación, se comparó un escenario carente de interacción química con un escenario que posee interacciones químicas debidas a la inclusión de inventarios de emisiones. En esta etapa, las partículas de aerosol sirven como núcleos de

condensación para la formación de gotas de nube (hipótesis 1); esto ocurre porque las gotitas se forman por la condensación de vapor de agua sobresaturado en las partículas presentes en la atmósfera.

En una segunda etapa de simulación, se quiso comprobar la teoría que dice que, cuando las nubes se forman como parte de las altas cantidades de CCN en el aire; esto hace que se reduzca la coalescencia y esto conduce a una supresión de la precipitación (hipótesis 2) (Andreae, 2004). Sumado a esto, (Tang et al., 2014) demostró que existe una relación estrecha entre el aerosol y el radio efectivo de la nube, que depende en gran medida de las condiciones climáticas, la disponibilidad de viento y la humedad.

Para que las precipitaciones se vean incrementadas, el número de partículas que están presentes en la atmósfera no debe superar el número crítico de partículas porque el vapor de agua no sería suficiente para formar una nube con radios pequeños.

En el caso de que las precipitaciones se vean reducidas, es porque el número crítico de partículas presentes en la atmósfera sobresatura con CCN para formar nubes con radios más pequeños que el radio crítico, entonces las precipitaciones que alcancen el suelo serán pocas o nulas (R C Pérez, n.d.).

Estos son los principios que se utilizan, por ejemplo, en las operaciones de siembra de nubes.

Algunos estudios recientes (Koren et al., 2014)(Wang et al., 2015) han demostrado que las nubes y la precipitación son muy sensibles al aerosol cuando la atmósfera pasa de las condiciones inalteradas a las ligeramente contaminadas. Por lo tanto, más atención se centra en la etapa inicial de la contaminación atmosférica (Guo et al., 2018).

La Tabla 11 resume los resultados obtenidos en los escenarios propuestos para simular con WRF-Chem. La tabla contiene los valores de precipitación acumulada (mm), medianas y promedios para el evento de 4 días. Los resultados se resumen (a) a nivel regional, donde se consideró el dominio de trabajo completo, y (b) el nivel local que es la provincia de Mendoza.

ESCENARIOS SIMULADOS							
PRECIPITACIÓN ACUMULADA	OFF_Q	ON_Q	ON_Qx100	ON_Qx1000ch	ON_Qx1000G	ON_Qx5000	ON_Qx10000
REGIONAL	7693.38	9219.57	8784.90	8931.24	8060.36	6104.16	5513.02
LOCAL	1538.65	1672.12	1545.12	1659.92	1255.96	784.68	667.06
MEDIANAS							
REGIONAL	0.09	0.12	0.16	0.11	0.13	0.04	0.03
LOCAL	9.77	9.95	9.64	9.73	7.04	4.34	3.37
PROMEDIOS							
REGIONAL	1.89	2.26	2.16	2.19	1.98	1.50	1.35
LOCAL	10.26	11.15	10.30	10.07	8.37	5.23	4.47

Tabla 11. Parámetros calculados (mm) con WRF-Chem para los diferentes escenarios en las escalas regional (dominio completo) y local (Mendoza)

Al analizar los promedios obtenidas a nivel regional, se puede observar que con la química ON\_Q hay un aumento del 20% aproximadamente con respecto al escenario sin química OFF\_Q.

Cuando hay un gran aumento, aumento extremo, de partículas ON\_Qx10000 hay una disminución de la precipitación del 40% en comparación con un escenario con química estándar.

Mientras que a nivel local, el aumento obtenido al incluir las emisiones es del 8% en comparación con una atmósfera completamente limpia, y al alterar estas emisiones en un factor de 10000 también hay una disminución en las cantidades de lluvia del 60%. La relación entre el escenario con la química del inventario ON\_Q y el aumento por un factor de 1000G indica que hay una disminución en la precipitación del 3% a nivel regional y de aproximadamente 10% a nivel local.

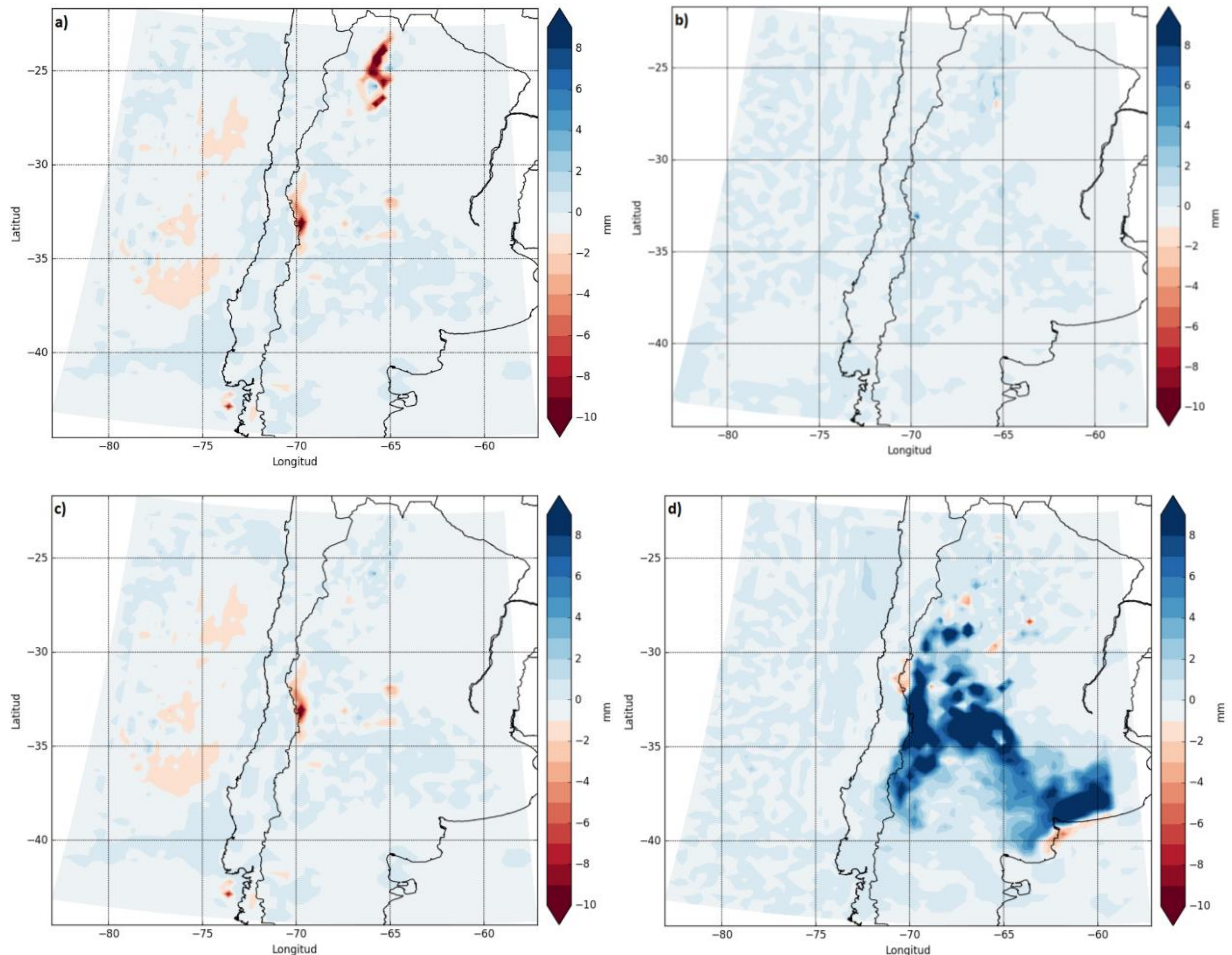


Figura 47. Diferencias entre los escenarios de propuesta para el evento ocurrido entre el 26 y el 30 de enero de 2013. (a) Dif. sin química - con química (OFF\_Q - ON\_Q), (b) Dif. con química - con química incrementada x 1000 (OFF\_Q - ON\_Qx1000ch), (c) Dif. sin química- con química incrementada x 1000 (OFF\_Q - ON\_Qx1000ch), (d) Dif- con química incrementada x 1000 - con química incrementada x 10000 (ON\_Qx1000ch - ON\_Qx10000)

Observando las modificaciones de la humedad realtiva (Figura 48), por encima de los 3km y frente a un corte a los 32° de Latitud Sur a las 21UTC, puede observarse que al incrementar las emisiones la humedad relativa tiende a disminuir.

Esta tendencia puede estar enmascarada por el cambio climático, que provoca la variabilidad de los parámetros meteorológicos inducido por diversos forzamientos.

Esto puede estar provocado porque a mayores cargas de aerosol, se altera el albedo y se modifica la cantidad de radiación, se alteran las temperaturas y por ende, se modifican las cantidades de agua presentes en la atmósfera. En consecuencia, esto determina la

distribución y la baja intensidad de las precipitaciones sobre la zona analizada en el escenario propuesto.

Para que se vea favorecida la nucleación para la formación de gotas, las temperaturas deben ser bajas y la humedad alta.

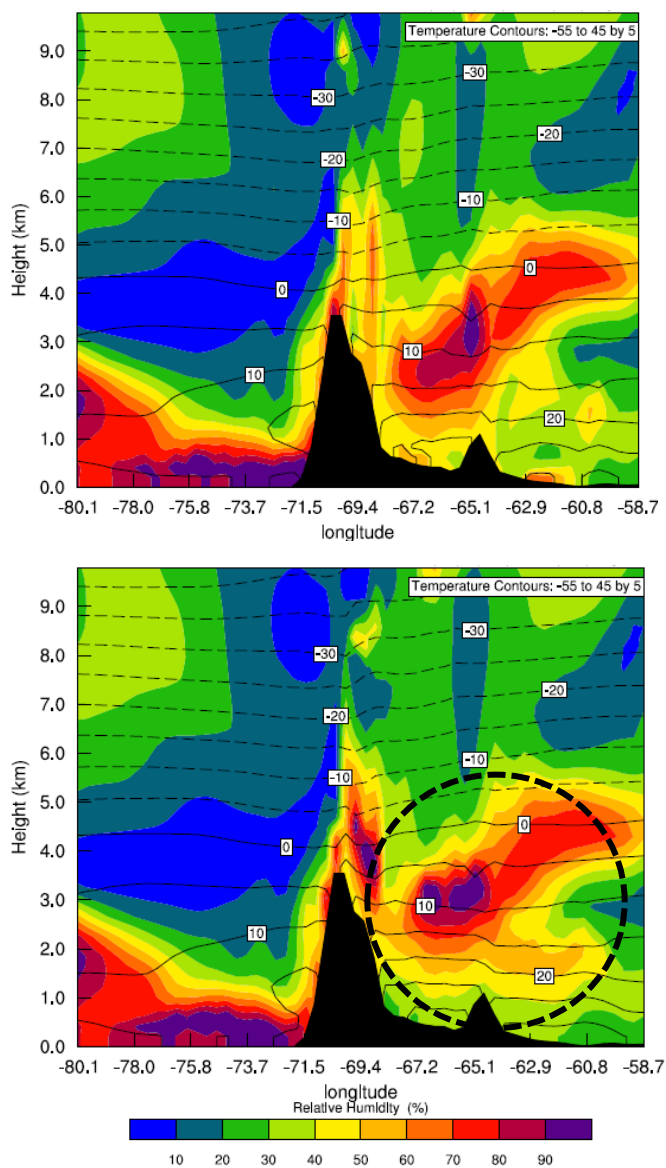


Figura 48. Perfiles verticales de humedad relativa para una latitud  $32^{\circ}$  y 21UTC para el evento simulado entre el 26 y 30 de enero de 2013 (a) con química ON\_Q, (b) con química incrementada en 1000 ON\_Qx10000. La línea punteada indica la región con mayores alteraciones identificada

Para los casos no extremos propuestos, al observar los datos proporcionados por los promedios a escala regional se observa que al incrementar la química en un factor de 100, las precipitaciones disminuyen un 4,5% respecto del escenario con química estándar. Para el caso de incrementar en 5000 las emisiones, la disminución de lluvias es de aproximadamente el 30%.

A escala local, un incremento moderado de emisiones disminuye las precipitaciones en un 8% mientras que un incremento de 5000 provoca un 53% menos de lluvias.

De la modelación efectuada puede concluirse en que las perturbaciones de los aerosoles deben considerarse en escalas mucho mayores que la escala de la perturbación.

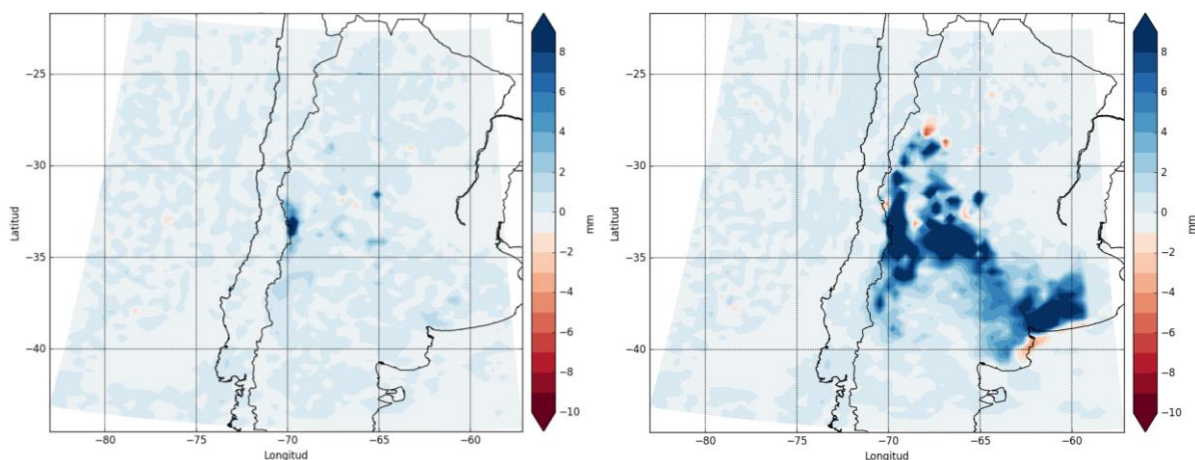


Figura 49. Diferencias entre los nuevos escenarios para el evento ocurrido entre el 26 y el 30 de enero de 2013. (a) Dif. con química - con química incrementada x 100 (ON\_Q - ON\_Qx100) (b) Dif. con química - con química incrementada x 5000 (OFF\_Q - ON\_Qx5000)

### 3.1.1. Comprobación

Se buscó encontrar una comprobación independiente utilizando datos de fuentes, independientes de los ya utilizados, a fin de evaluar si la presencia de material particulado tenía alguna influencia sobre los patrones de precipitación.

Para ello, se seleccionaron dos bases de datos con suficiente longitud, validadas externamente disponibles para el territorio nacional.

En particular, la idea es evaluar el impacto de los incendios sobre las precipitaciones.

Los incendios generan profundos impactos sobre los ecosistemas e impactos socioeconómicos sobre la población.

En este análisis se quiso comprobar que los aerosoles generados en incendios desarrollados alrededor de un punto sobre la provincia de Mendoza, provocan un impacto sobre las precipitaciones.

#### 3.1.1.1. Base de datos de incendios

Para la localización de quema de pastizales y otros incendios de biomasa (naturales y/o artificiales) se usó la colección C6 del sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) abordo de los satélites Terra y Aqua (Giglio et al., 2013) (Giglio et al., 2009), entre los años 2007 y 2017. Esta colección provee dos tipos de productos: puntos de fuego (fire-events) y área quemada (con porcentajes correspondientes a diversos usos de suelos). Para estimar las emisiones se tuvo en cuenta el área afectada y el tipo de suelo detectados (IPCC 2006, Vol. 4, Cap 2, Ec. 2.27, EMEP 2013, Cap. 11.B):

$$E_{\text{FIRE}}(c) = \sum_{n,l} [A_{\text{FIRE}}(l) \times \alpha(l) \times \beta(l) \times EF(l, c)] \quad (19)$$

Donde:

$E_{\text{FIRE}}$ : Emisión total del contaminante c

$\alpha$ : Fracción disponible de biomasa sobre el suelo ( $\text{kg.m}^{-2}$ )

$\beta$ : Factor de combustión (fracción de biomasa que realmente se quema)

$A_{\text{FIRE}}$ : Área quemada por tipo de suelo

EF: Factor de emisión para cada contaminante y tipo de vegetación o uso del suelo.

Las emisiones detectadas en suelo urbano, se consideraron como quema de residuos urbanos no controlados. La quema accidental o inducida de residuos urbanos que no fueron dispuestos en los vertederos es una situación o práctica muy habitual en centros urbanos.

### 3.11.2. CHIRPS

El producto de precipitación mensual CHIRPS se obtuvo a través del sitio web Climate Hazards Group (CHG) de la Universidad de California en Santa Barbara (UCSB) (<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/index.html>).

Este conjunto de datos de precipitación se actualiza casi en tiempo real, tiene una cobertura casi global, con una resolución espacial de  $0.05^\circ$  (aproximadamente 5 km) y varias escalas de tiempo. El conjunto de datos CHIRPS se produjo combinando estimaciones de precipitación basadas en observaciones de la duración de la nube de infrarrojos fríos (CCD) calibrada utilizando el análisis de precipitación multisatelital (MSPA) de la Misión de medición de lluvias tropicales (TRMM) con datos de estaciones in situ de una variedad de fuentes, incluyendo datos nacionales y fuentes regionales. Además, la resolución espacial de CHIRPS es mayor que la de otros conjuntos de datos de precipitación global basados en satélites, lo que hace que sea ventajoso analizar las variaciones de precipitación a pequeñas escalas.

El conjunto de datos de CHIRPS puede capturar las características de la temporada de lluvias en Los Andes Centrales. CHIRPS logra mejores resultados para las estaciones ubicadas en la región con un máximo de precipitación en verano, en su mayoría ubicadas en la región de Cuyo (Rivera et al., 2018)



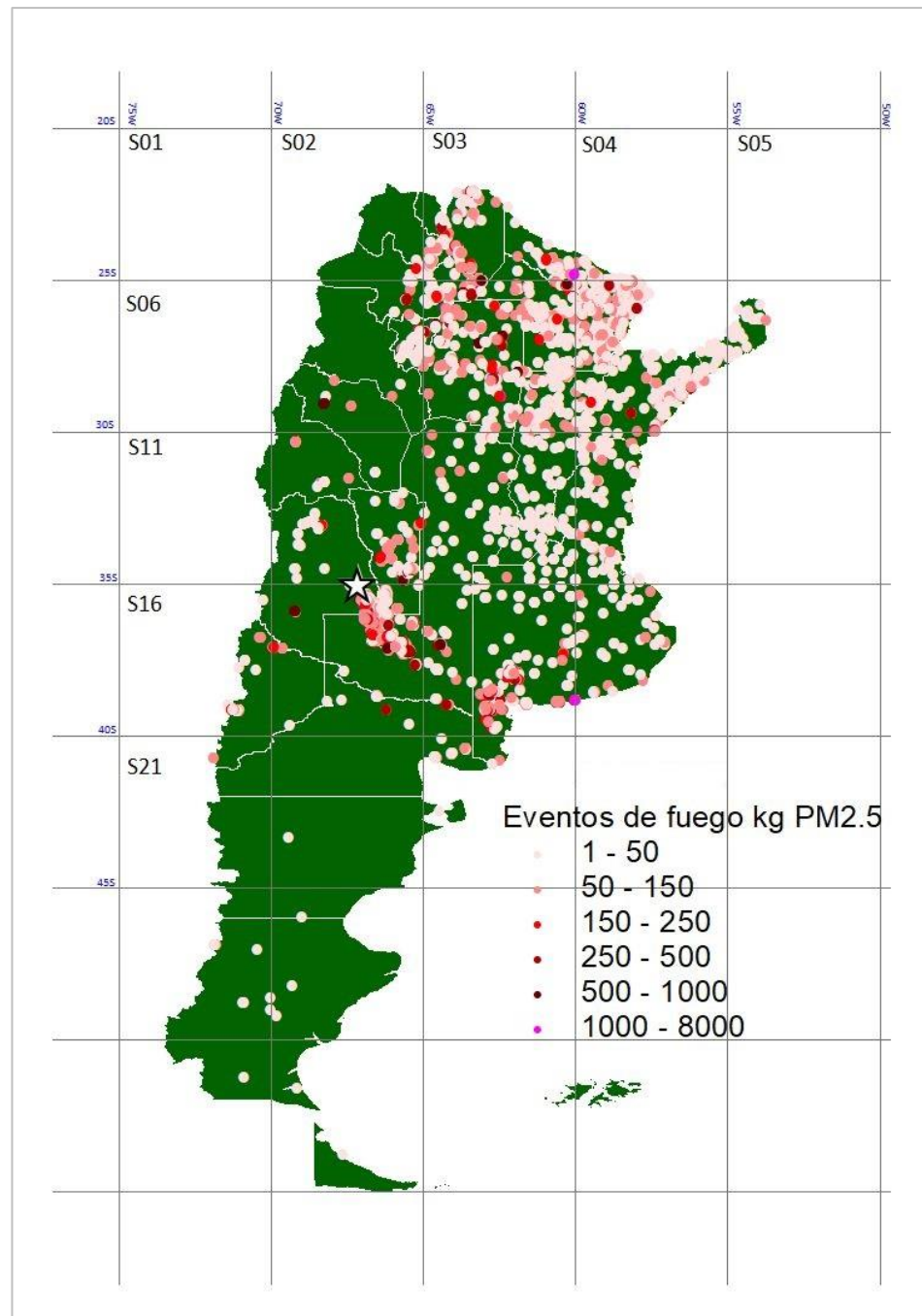


Figura 50. Eventos de fuego registrados y sus correspondientes emisiones en kg de PM 2.5 en enero de 2013

### 3.11.3. Análisis de datos

Para correlacionar la información de incendios con la información de precipitaciones obtenidas de los satélites se dividió a la Argentina en sectores de 5x5°, quedando el área total desagregada en 5x7 sectores desde la esquina superior NO (-75, -20) tal y como se muestra en las Figuras 50 y 51, abarcando el territorio nacional. Esta metodología ha sido aplicada en estudios previos como (Loeb & Schuster, 2008) para trabajar con regiones individuales más pequeñas.



s1	s2	s3	s4	s5
s6	s7	s8	s9	s10
s11	s12	s13	s14	s15
s16	s17	s18	s19	s20
s21	s22	s23	s24	s25
s26	s27	s28	s29	s30
s31	s32	s33	s34	s35

Figura 51. Distribución de sectores definidos para el análisis de la relación entre precipitaciones e incendios de Argentina entre 2007-2017  
En rojo, punto dentro de la provincia de Mendoza, seleccionado para el análisis

En cada sector se acumularon los eventos de incendios ocurridos entre los años 2007 y 2017 y se calcularon las emisiones de material particulado PM 2.5 según la ecuación (19).

Para cada sector definido, se calcularon los totales, máximos, mínimos, medianas y promedios de incendio. Se obtuvo información tanto mensual como anual para el período de 10 años.

Tanto s3, como s8 y s9 muestran mayor cantidad de incendios durante los meses de primavera (septiembre, octubre y noviembre), los mismos pueden estar relacionados con la quema de biomasa en el Norte Argentino, producto del desmonte, quemas agrícolas y catástrofes naturales. Mientras que s17 y s18 tienen mayor registro de incendios durante el mes central del verano, enero, especialmente por la ocurrencia de tormentas eléctricas que incendian los pastizales secos de la zona.

Respecto de las precipitaciones, se eligió un punto dentro de los límites de la provincia de Mendoza, coincidente con la zona de modelación empleada en la sección 3.6; correspondiendo a un punto sobre la cuadrícula, entre s12 y s17.

Los sectores 12, 13, 17 y 18 se eligieron por ser los más cercanos al punto seleccionado.

Se establecieron ciertas condiciones para estudiar correlaciones entre sectores y para la obtención de información más localizada. Los días con registro de precipitaciones en el punto de referencia se dividieron en 3 grupos de acuerdo al nivel de emisiones presuntamente presentes debido a la existencia de incendios locales. Seleccionamos días en que hubiese precipitaciones en el punto de referencia y las emisiones derivadas de los incendios cumplieran alguna de las condiciones.

\* Condición 1: *Atmósfera Limpia* ( $E < 150\text{kg}$ )

Existe incendio en s12, s13, s17, s18

Las emisiones acumuladas de PM 2.5 en los cuatro sectores están entre 0 y 150 kg

\* Condición 2: *Atmósfera Media* ( $150\text{kg} < E < 500\text{kg}$ )

Existe incendio en s12, s13, s17, s18

Las emisiones acumuladas de PM 2.5 en los cuatro sectores están entre 150 y 500 kg

\* Condición 3: *Atmósfera Cargada* ( $E > 500\text{kg}$ )

Existe incendio en s12, s13, s17, s18

Las emisiones acumuladas de PM 2.5 en los cuatro sectores superan los 500 kg

### 3.1.2. Resultados: Incendios vs precipitaciones

La Tabla 12 resume los datos de incendio obtenidos de los sectores que resultaron más significativos en el grillado del territorio argentino durante este estudio, expuesto en la Figura 50.

	SECTOR									
	s3	s8	s9	s12	s13	s14	s16	s17	s18	s19
MAXIMO	502.03	768.32	223.42	185.42	158.96	462.20	100.68	128.75	323.71	6.82
MEDIANA	461	1.040	531	82	100	60	-	12	27	-
PROMEDIO	8.940	14.100	4.177	1.405	641	1.027	135	828	1.281	71
CONTAR 0	1.091	521	779	1.168	707	1.276	3.471	1.883	1.534	2.153
CONTAR TOTAL	4.018	4.018	4.018	4.018	4.018	4.018	4.018	4.018	4.018	4.018
CONTAR >0	2.927	3.497	3.239	2.850	3.311	2.742	547	2.135	2.484	1.865
>0/TOTAL	73%	87%	81%	71%	82%	68%	14%	53%	62%	46%

Tabla 12. Estadísticas para los sectores más significativos del área en estudio (emisiones en toneladas/año)

Como puede verse en la Figura 52, elaborada a partir de los datos de incendio, a través de los años existe una tendencia a la disminución de éstos. Esto puede ser debido a la disminución en la quema de masa de residuos agrícolas y a la aplicación de métodos de siembra directa.

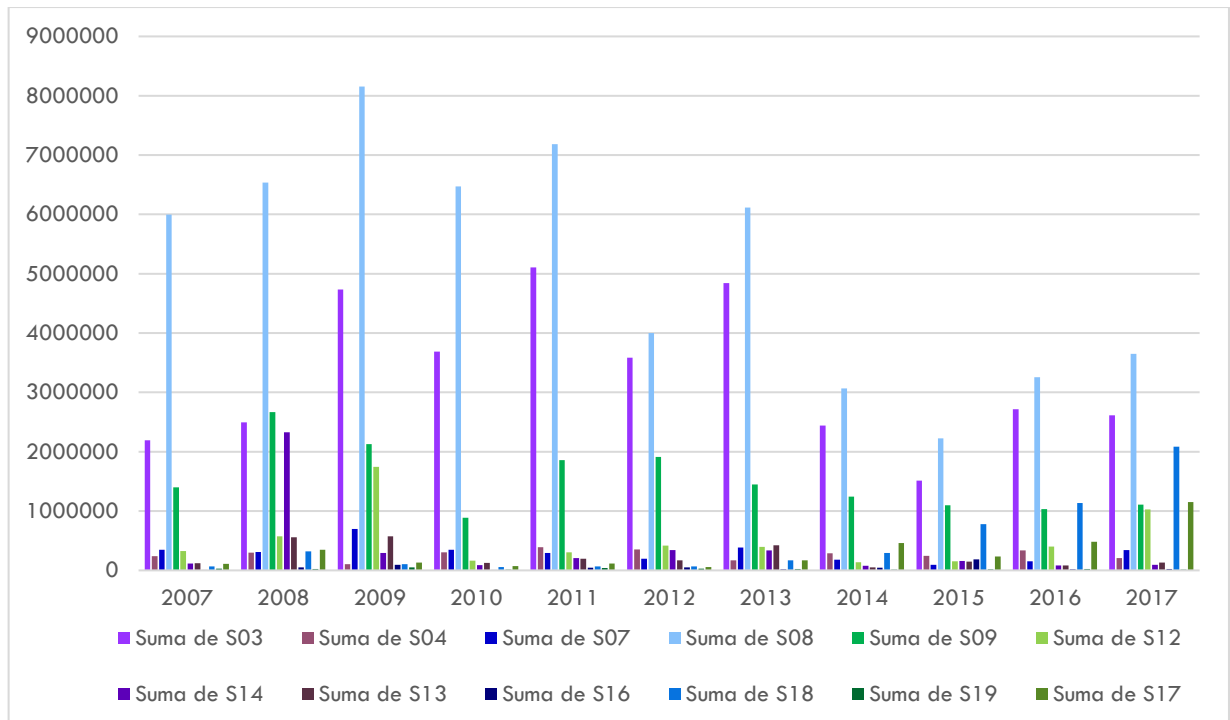


Figura 52. Incendios registrados por sector en el período comprendido entre 2007 y 2017

Como ya ha sido comentado en secciones previas, en este caso con la base de datos obtenida de CHIRPS para el punto (35°S, 67.5°O) que fue elegido en la sección 3.11.3. puede verse al realizar el análisis de la serie temporal, que existe una tendencia levemente positiva al aumento de precipitaciones a lo largo del tiempo. En la Figura 53 se muestra el promedio de precipitaciones anuales entre los años 1981 y 2017, la tendencia lineal indica un  $R^2$  de 0.0687.

En la Figura 54 se puede ver con claridad la distribución estacional de precipitaciones en el punto de estudio, la gráfica muestra la prevalencia de las precipitaciones veraniegas por sobre las otras estaciones. Las estaciones intermedias, otoño y primavera, también poseen precipitaciones pero con cantidades totales menores.

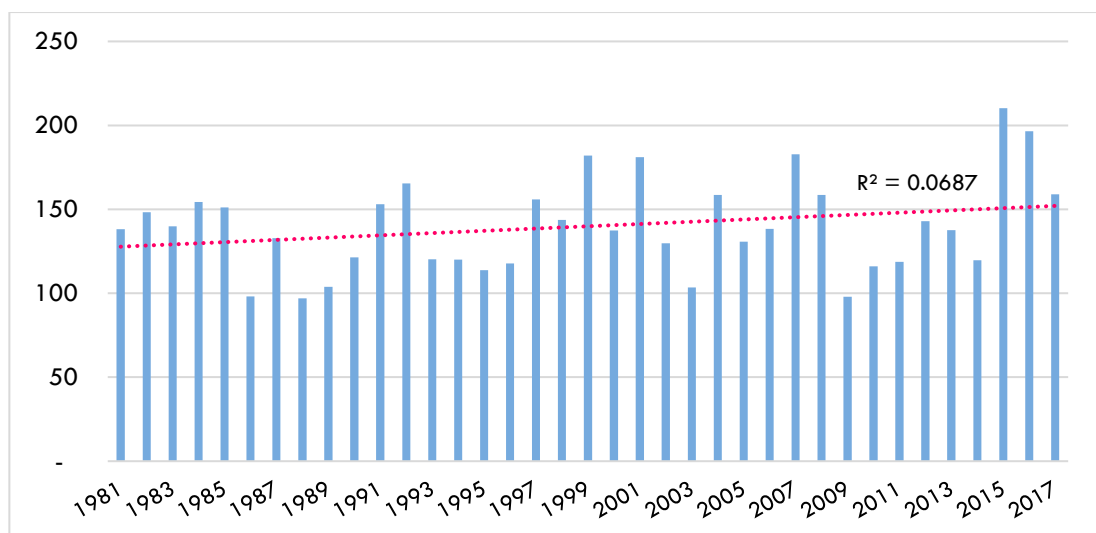


Figura 53. Promedio de precipitaciones anuales a partir de datos obtenidos de CHIRPS entre 1981 y 2017

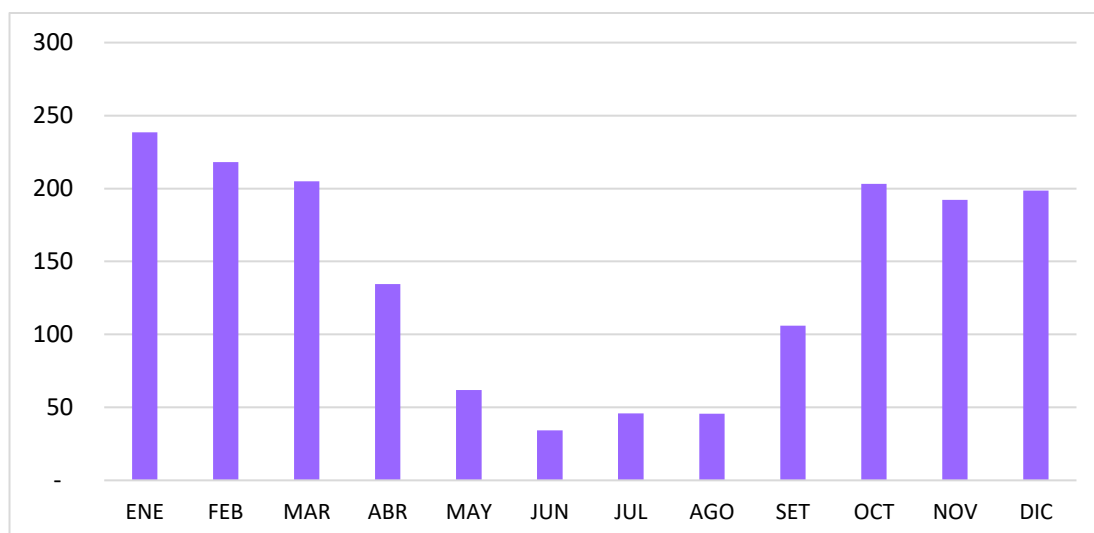


Figura 54. Promedio de precipitaciones mensuales a partir de datos obtenidos de CHIRPS entre 1981 y 2017

La Tabla 13 muestra los resultados promedio del análisis sobre los datos satelitales de incendio (MODIS) y precipitación (CHIRPS) en un período de 10 años, bajo las condiciones detalladas en la Sección 3.11.3.

Figuras 55 y 56 muestran gráficamente la información de esta tabla.

	<b>PROMEDIO PRECIPITACIONES (mm)</b>			<b>PROMEDIO PM 2,5 (kg)</b>		
	150kg>E	150kg<E<500kg	E>500kg			
	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 1	Condición 2	Condición 3
2007	594	589	442	59	316	4167
2008	494	426	392	83	302	6869
2009	243	323	190	70	314	14874
2010	414	256	316	80	305	1766
2011	487	843	232	61	304	2527
2012	346	341	322	74	292	4923
2013	281	397	391	70	259	6624
2014	307	490	284	67	285	8311
2015	604	422	411	60	313	6267
2016	459	581	342	70	280	13545
2017	763	263	363	47	293	19645
<b>Prom.Totales</b>	<b>455</b>	<b>445</b>	<b>337</b>	<b>68</b>	<b>297</b>	<b>8518</b>

Tabla 13. Promedios anuales de precipitaciones (mm) y de PM 2.5 (kg) obtenidos del análisis de datos satelitales para el territorio argentino en el período comprendido entre 2007 y 2017

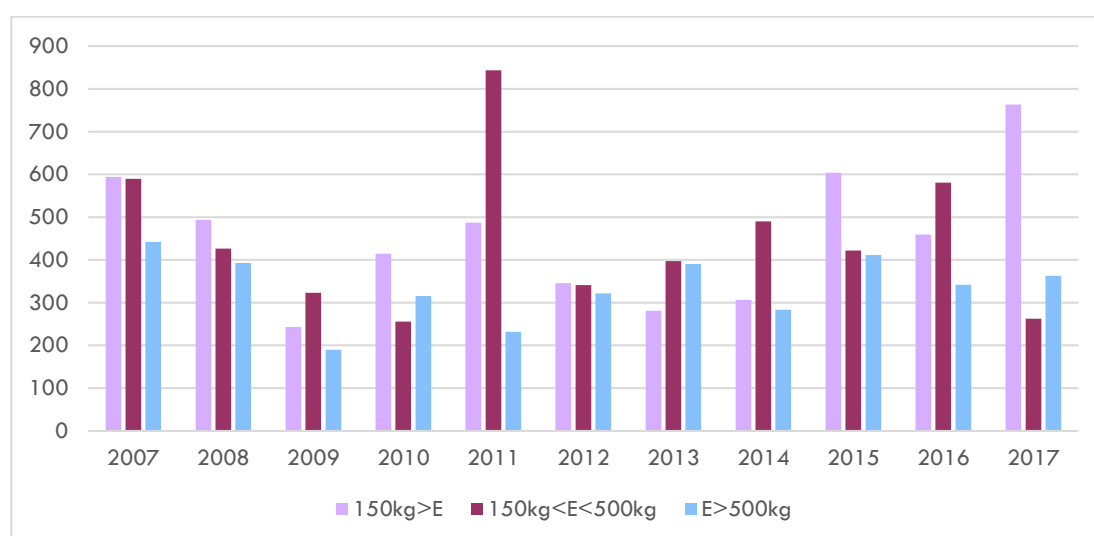


Figura 55. Promedio de precipitaciones anuales para el período 2007-2017 bajo las diferentes cantidades de material particulado PM 2.5 establecidas en las condiciones de análisis

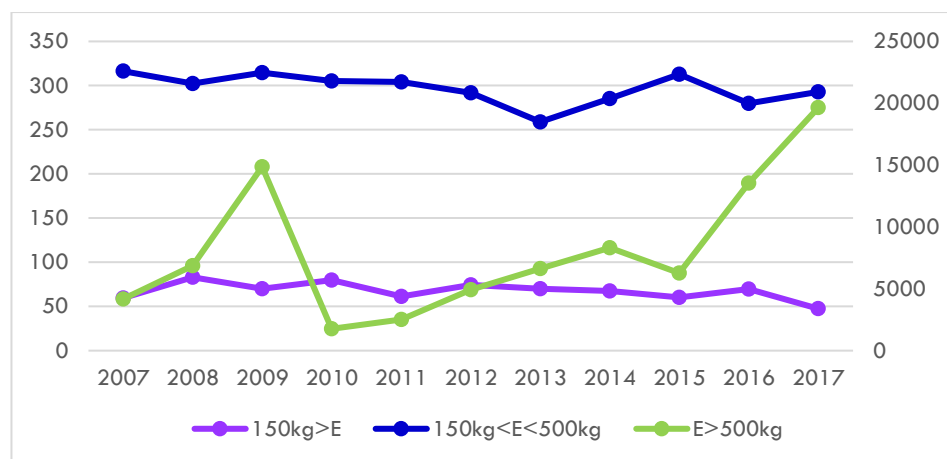


Figura 56. Promedio de material particulado anual para el período 2007-2017 de acuerdo a las condiciones de análisis.  
En el eje vertical izquierdo se indican las cantidades para las condiciones 1 y 2, mientras que en el eje vertical derecho se indican las cantidades para la condición 3.

Los resultados muestran que al registrarse mayor cantidad de PM 2.5 como consecuencia de la existencia de incendios sobre los sectores de la Argentina que rodean al punto de estudio de Mendoza, las precipitaciones acumuladas presentan una disminución.

Si bien estas tendencias pueden estar enmascaradas por el cambio climático, los análisis llevados a cabo en el desarrollo de esta tesis son los primeros en su tipo aplicados sobre el territorio argentino.

Si se considera como atmósfera limpia, aquella con cantidades de PM inferiores a 150kg, puede notarse que al aumentar los totales de kg emitidos entre 150-500, las precipitaciones disminuyen en un 2%, mientras que para una atmósfera cargada con más de 500kg de PM la disminución en las cantidades acumuladas es de aproximadamente el 26%.

La investigación demuestra cómo las mayores disminuciones de lluvias se registran cuando las cantidades de PM se incrementan en aproximadamente 125 veces.

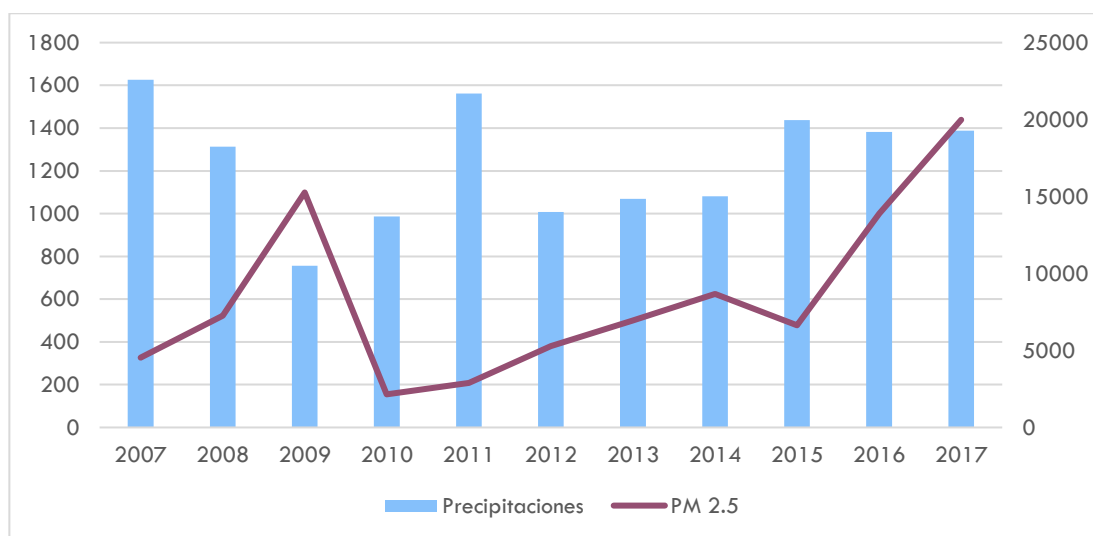


Figura 57. Promedios anuales de precipitación (mm) medidos en el eje vertical izquierdo y promedios anuales de PM 2.5 (kg) medidos en el eje vertical derecho para el período 2007-2017 en el punto (35°S, 67.5°O)

A continuación, en la tabla 14 se concentran los resultados pero esta vez se hizo el análisis por mes para las mismas variables y bajo las mismas condiciones.

	PROMEDIO PRECIPITACIONES			PROMEDIO PM 2,5		
	150kg>E	150kg<E<500kg	E>500kg			
	Condición 1	Condición 2	Condición 3	Condición 1	Condición 2	Condición 3
ENERO	897	819	503	76	309	18793
FEBRERO	644	774	735	76	293	7961
MARZO	793	799	729	67	269	2216
ABRIL	468	409	358	57	266	2633
MAYO	130	114	106	54	285	1400
JUNIO	81	89	53	63	311	2484
JULIO	87	98	67	78	322	2076
AGOSTO	165	118	98	99	313	9333
SEPTIEMBRE	394	213	300	63	324	9290
OCTUBRE	687	792	497	69	292	9871
NOVIEMBRE	588	692	391	76	271	6472
DICIEMBRE	506	497	483	83	339	11718

Tabla 14. Promedios mensuales de precipitaciones (mm) y de PM 2.5 (kg) obtenidos del análisis de datos satelitales para el territorio argentino en el período comprendido entre 2007 y 2017

Las tendencias son las mismas que las mostradas en los análisis anuales de variables presentados anteriormente. A mayores cargas de PM presentes en la atmósfera, como consecuencia de incendios en la zona, menores son los registros de precipitación acumulada (Ver Figuras 58 y 59).

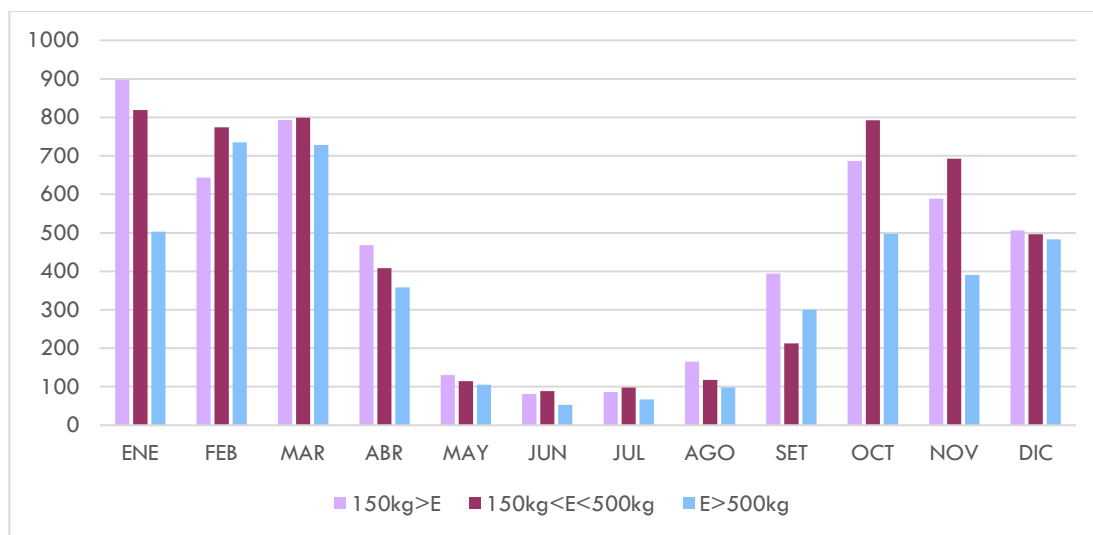


Figura 58. Promedio de precipitaciones mensuales para el período 2007-2017 bajo las diferentes cantidades de material particulado PM 2.5 establecidas en las condiciones de análisis

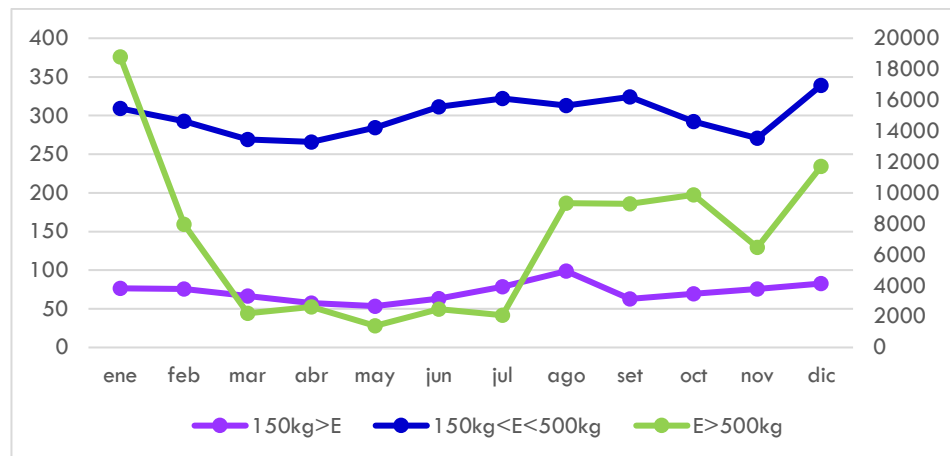


Figura 59. Promedio de precipitaciones mensuales para el período 2007-2017 bajo las diferentes cantidades de material particulado PM 2.5 en kg establecidas en las condiciones de análisis. En el eje vertical izquierdo se indican las cantidades para las condiciones 1 y 2, mientras que en el eje vertical derecho se indican las cantidades para la condición 3.

### 3.13. Análisis de trayectorias con HYSPLIT

Finalmente, para investigar el papel del transporte de largo alcance en la concentración de aerosoles sobre el territorio argentino, se calcularon entre 2 y 3 días de retrotrayectorias y trayectorias directas de las masas de aire a 3000 m sobre el nivel del suelo (altura aproximada de la formación de nubes) utilizando el Modelo HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Tejectory Model) (Rolph et al., 2017) (Stein et al., 2015). Este es un modelo híbrido entre euleriano y lagrangiano que calcula la dispersión y deposición por Lagrange, mientras que la concentración de contaminantes se calcula en el marco de Euler.

Entre las aplicaciones de mayor importancia, los modelos con enfoque Lagrangiano pueden calcular las rutas de transporte de contaminantes empleando cálculos de trayectoria de avance (Bowman et al., 2013).

Algunas de las trayectorias calculadas se muestran en la Figura 60, para un día de enero dentro del evento simulado en esta tesis (28 de enero de 2013 a las 21UTC) donde se observa que la dirección predominante del viento durante los 3 días posteriores, fue hacia el Sureste argentino (sur de Buenos Aires).

Mientras que la Figura 61 muestra las retrotrayectorias para el mismo día, 28 de enero de 2013 a las 21 UTC, calculadas para un período de 48 horas, comenzando el 26 de enero de 2013 a la misma hora. Se observa la dirección del viento que llega al punto analizado (35°S, 67.5°O) proviene desde los sectores del territorio argentino en donde hubo registro de incendios según el análisis efectuado previamente.



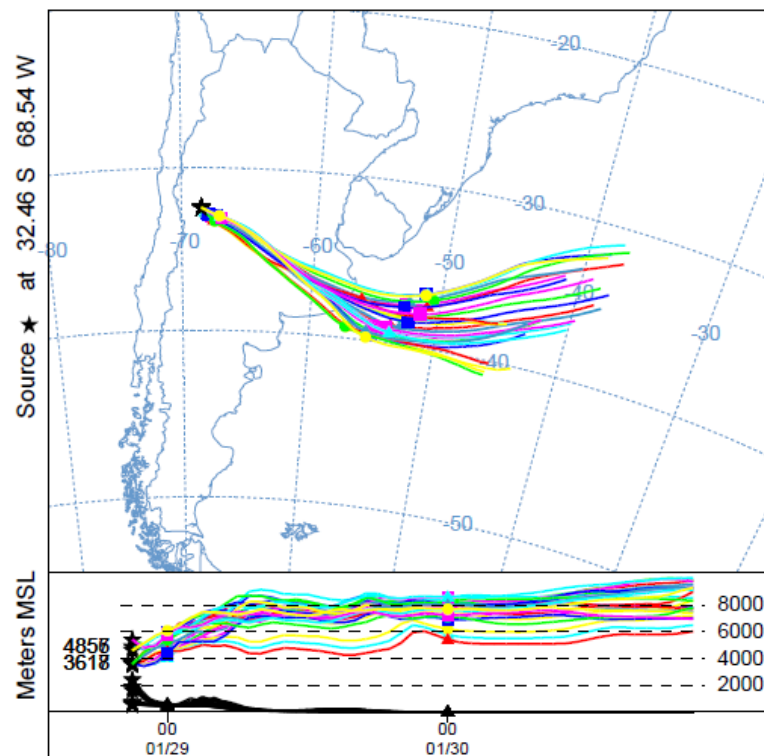


Figura 60. Trayectorias directas para el evento analizado en esta investigación usando NOAA/ MODELO HYSPLIT

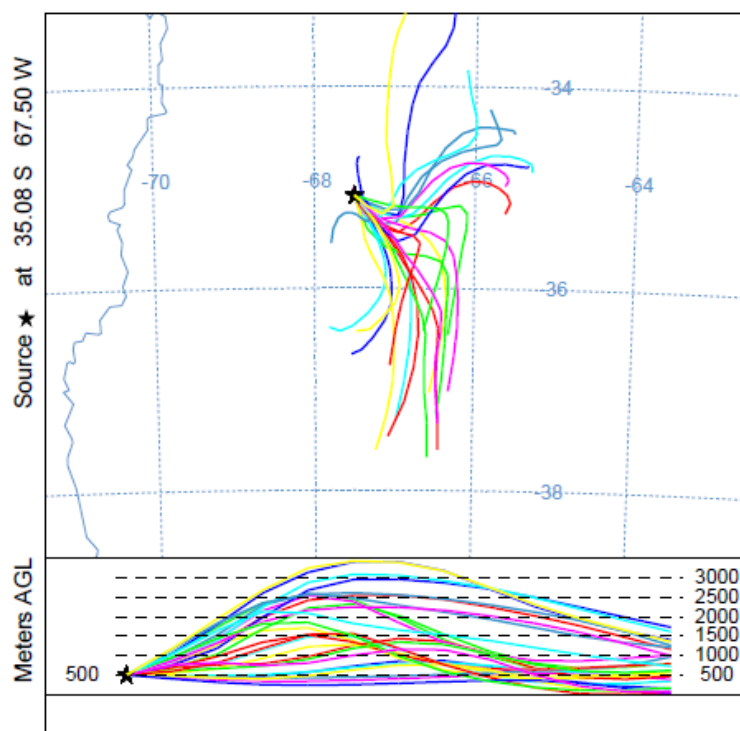


Figura 61. Retrotrayectorias para el evento analizado en esta investigación usando NOAA/ MODELO HYSPLIT

## Capítulo IV : CONCLUSIONES

Los sistemas naturales son muy complejos y dinámicos, están conformados por numerosos componentes que interactúan y pueden generar un abanico de efectos. Esto es lo que mantiene a la comunidad científica dedicando sus mejores esfuerzos desde hace varias décadas para poder conocer estos componentes.

Esta tesis, se centró en la investigación del efecto que tienen los aerosoles en suspensión sobre los cambios generados en los patrones de precipitación. Teniendo en cuenta que la cuantificación y caracterización del impacto de las emisiones antrópicas de aerosoles a la atmósfera, posee todavía un alto grado de incertidumbre en lo relativo a la predicción del comportamiento de las variables meteorológicas, y por lo tanto en el clima; sus aportes se orientaron a la obtención de nuevos conocimientos y extensión de los ya existentes. La incertidumbre existente debe ser reducida con el objeto de estimar de una mejor manera el impacto de las emisiones a la atmósfera.

Como se explicó en la sección de “Motivación de estudio”, los resultados de esta tesis aportan información respecto a una discusión que todavía no está resuelta y resulta interesante abordar. Varios autores han encontrado que la contaminación atmosférica puede suprimir las precipitaciones, mientras que otros han encontrado un aumento de las mismas alrededor de áreas densamente contaminadas.

Esta controversia acerca del rol que cumplen los aerosoles, resalta que el tema aún no está completamente establecido. Es por ello, que aquí se presenta un primer panorama de la situación en nuestro país.

En términos generales, los objetivos planteados inicialmente fueron alcanzados: Este estudio es el primero de su tipo en esta región de Argentina, donde los recursos hídricos son de vital importancia por tratarse de un área densamente poblada con actividad agrícola intensiva. Puede trasladarse su aplicación a zonas de características similares.

Mediante el modelado con WRF se pudo reproducir de manera satisfactoria eventos de precipitación en una zona con topografía y meteorología complejas.

Fue posible implementar un sistema de modelado acoplado meteorología – química sobre nuestro país para trabajar a nivel regional y local.

Se presentaron los resultados para el diseño preliminar en la inclusión de aerosoles a escala regional, utilizando inventarios de emisiones de alta resolución preparados por nuestro grupo de investigación. Mediante el empleo de WRF-Chem se obtuvieron los primeros indicios acerca la existencia de una influencia de la contaminación sobre las lluvias. El modelo resultó sensible a la inclusión de aerosoles.

Los análisis estadísticos de datos permitieron localizar correlaciones entre los contaminantes y las medidas de precipitaciones de los pluviómetros y satélites. Las mayores dificultades se presentaron a la hora de obtener datos de observación. Hay baja densidad de estaciones meteorológicas en el área, discontinuidades e inhomogeneidades en determinadas series, registros menores a 100 años y una importante variabilidad interanual de la precipitación.

Se obtuvieron mapas con la distribución espacial y temporal de contaminantes antrópicos que afectan la calidad del aire de nuestro país. El modelado mostró que incluir aerosoles genera modificaciones en el patrón de las precipitaciones. El grado de impacto parece ser sensible a la tasa de emisión y al nivel de concentraciones de la zona.

Para llevar a cabo los objetivos, se plantearon, simularon y evaluaron diferentes escenarios, en donde la principal variable era la cantidad de emisiones introducidas. En este sentido, el modelado numérico con WRF-Chem sugiere que la inclusión de mayor cantidad de aerosoles produce una reducción de las precipitaciones, tanto a nivel regional como a nivel local. Pudo verse que, a escala regional (Argentina), al incrementar la química en un factor de 100, las precipitaciones disminuyen aproximadamente un 5% respecto del escenario con química estándar y en caso de incrementar en 5000 la tasa de emisión, la disminución de lluvias es del 30%. Mientras que a escala local (Mendoza) un incremento moderado de emisiones disminuye las precipitaciones en un 8% mientras que una ampliación de emisiones por 5000 provoca un 53% menos de lluvias. Considerando eventos más extremos, con un factor de 10000, las medidas registradas rondan alrededor del 65% menos.

De la modelación efectuada puede concluirse en que para esta región, un incremento en la tasa de contaminantes conduce a un decremento en la tasa de precipitaciones.

Del modelo se puede ver además, que la dispersión y la deposición no sólo están influenciadas por el origen de las fuentes de contaminantes, sino también por la compleja topografía y la meteorología del área de estudio. El modelo puede ayudar a diagnosticar y cuantificar los impactos de los aerosoles en la nube en diferentes condiciones.

Utilizando productos satelitales de fuentes independientes, con datos validados y de longitud suficiente, se pudo comprobar que la presencia de material particulado en la atmósfera provoca modificaciones sobre las lluvias en Mendoza. Al realizar un análisis sobre un período de 10 años, para conocer el posible impacto de los incendios sobre los patrones de precipitación, los resultados mostraron que al haber mayores cantidades de PM 2.5 como consecuencia de la existencia de incendios, las precipitaciones acumuladas presentan una disminución en la provincia de Mendoza. Mediante un análisis de retro trayectoria se observa que el patrón de viento predominante proviene desde los sectores del territorio argentino, en donde hubo registros de incendios significativos.

Enriquecer la modelación implicaría, necesariamente, continuar mejorando los inventarios de calidad de aire elaborados por el Grupo GEAA, potenciar trabajos de cooperación entre grupos que trabajen en el tema, y probar con nuevas parametrizaciones que permitan analizar más puntualmente la interacción aerosoles-precipitación en la región de estudio.

Los esquemas de nube y aerosol seleccionados para la configuración de WRF-Chem no incluyen el análisis del número de gotas o la cantidad de CCN, por lo que el trabajo futuro implica implementar la activación de diferentes configuraciones que permitan enriquecer las conclusiones.

Esta investigación pretende continuar analizando diferentes eventos, poblaciones temporales más grandes, a una mejor escala, para encontrar relaciones más concluyentes entre las variaciones de los parámetros analizados.

Modelar siempre es un desafío que deja la puerta abierta para continuar investigando en esta línea.

## REFERENCIAS

- Brasseur, G. and Solomon, S.: *Aeronomy of the Middle Atmosphere—Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library 32, third edn., Springer, Dordrecht, the Netherlands, 2005.
- Ackerman, A., & Chung, H. (1992). *Radiative effects of airborne dust on regional energy budgets at the top of the atmosphere*.
- Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S., & Shankar, U. (1998). Modal Aerosol Dynamics model for Europe: Development and first applications. *Atmospheric Environment*, 32(17), 2981–2999. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00006-5)
- Agosta, E. A., & Cavagnaro, M. (2014). Variaciones interanuales de la precipitación de verano y el rendimiento del cultivo de la vid en Mendoza, (March).
- Aguilar, E., Peterson, T. C., Ramí, P., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., ... Neiva, S. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961 – 2003, 110, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Albrecht, B. A. (1989). Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245(4923), 1227–1230. <https://doi.org/10.1126/science.245.4923.1227>
- Allende, D. G. (2011). *Sistema de Modelado Ambiental Multimodo y Multiescala*. Universidad Nacional de Cuyo.
- Allende, D. G. (2015). MEDICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES DE PM 10 „
- Allende, D. G., Mulena, G. C., Puliafito, S. E., Lakkis, S. G., Cremades, P. G., & Castro, F. H. (2012). A first approach on modeling windblown dust in Zonda wind events. In *XI Congreso Argentino de MEteorología. CONGREMET* (p. 14). Mendoza, Argentina.
- Allende, D., Ruggeri, M. F., Lana, B., Garro, K., Altamirano, J., & Puliafito, E. (2016). Inventory of primary emissions of selected persistent organic pollutants to the atmosphere in the area of Great Mendoza. *Emerging Contaminants*, 2(1), 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2015.12.001>
- Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. *Geological Survey Professional Paper* 964, 34. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/pp/0964/report.pdf>
- Andreae, M. O. (2004). Smoking rain clouds over the Amazon. *Science (New York, N.Y.)*, 303(5662), 1337–1342. <https://doi.org/10.1126/science.1092779>
- Andreae, M. O., & Rosenfeld, D. (2008). Aerosol – cloud – precipitation interactions . Part 1 . The nature and sources of cloud-active aerosols, 89, 13–41. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.001>
- Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, a. a., Frank, G. P., Longo, K. M., & Silva-Dias, M. a. F. (2004). Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science*, 303(5662), 1337–1342. <https://doi.org/10.1126/science.1092779>
- Araneo, D. C., & Compagnucci, R. H. (2008). Atmospheric circulation features associated to Argentinean Andean rivers discharge variability. *Geophysical Research Letters*, 35(1), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2007GL032427>
- Artaxo, P. (1990). and Sources Basin During the Wet Season CantYoean • o Atlantic, 95.
- Artaxo, P., Gerab, F., Yamasoe, M. A., & Martins, J. V. (1994). Fine mode aerosol composition at

- three long-term atmospheric monitoring sites in the Amazon Basin mass concentration up to 700 • tg / m particle mass concentration alone can go as high as 400 • tg / m The fine mode biogenic and burning in Tropical Rain Fo. *Journal of Geophysical Research*, 99(D11), 22857–22868. <https://doi.org/10.1029/94JD01023>
- Betts, A. K., & Miller, M. J. (1986). A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(473), 693–709. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247308>
- Bevan, S. L., North, P. R. J., Grey, W. M. F., Los, S. O., & Plummer, S. E. (2008). The impact of atmospheric aerosol from biomass burning on Amazon dry-season drought. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, 114(666 SP), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008JD011112>
- Bindoff, N. L., Stott, P. A., AchutaRao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N., Gutzler, D., ... Zhang, X. (2013). WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO THE IPCC FIFTH ASSESSMENT REPORT CLIMATE CHANGE 2013 : THE PHYSICAL SCIENCE BASIS Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment A report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail .
- Borge, R., Alexandrov, V., José del Vas, J., Lumbreras, J., & Rodríguez, E. (2008). A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 42(37), 8560–8574. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.032>
- Borys, R. D., Lowenthal, D. H., & Mitchell, D. L. (2000). The relationships among cloud microphysics, chemistry, and precipitation rate in cold mountain clouds. *Atmospheric Environment*, 34(16), 2593–2602. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00492-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00492-6)
- Bowman, K. P., Lin, J. C., Stohl, A., Draxler, R., Konopka, P., Andrews, A., & Brunner, D. (2013). Input data requirements for Lagrangian trajectory models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(7), 1051–1058. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00076.1>
- Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1–3), 167–196. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0070-7>
- Chapman, E. G., Gustafson, W. I., Easter, R. C., Barnard, J. C., Ghan, S. J., Pekour, M. S., & Fast, J. D. (2009). Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(3), 945–964. <https://doi.org/10.5194/acp-9-945-2009>
- Charlson et al., 1992. (1992). *Climate forcing by anthropogenic aerosols*.
- Chen, F. (1996). Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFl - observations.pdf. *Water Resour. Res.*, 101(7251–7268), 7251–7268.
- Chin, M. (2000). Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D20), 24671–24687. <https://doi.org/10.1029/2000JD900384>
- Cremades, P. G. (2017). *Modelado de emisiones por Quema de Biomasa y evaluación de impacto en la calidad de aire en escala regional y local*.
- Cremades, P. G., Allende, D. G., & Puliafito, S. E. (2011). Inventario de emisiones por quema de biomasa y estimación de su influencia en la calidad de aire en la Provincia de Tucumán. In Salvador Enrique Puliafito (Ed.), *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina* (pp. 161–170). Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza.
- Cremades, P. G., Puliafito, Salvador Enrique, Allende, D. G., & Fernandez, R. P. (2011). An

- approach for using remote sensing products and ground observations in the evaluation of a Numerical Weather Prediction model. In O. Möller, J. W. Signorelli, & M. A. Storti (Eds.), *Mecánica Computacional Vol XXX* (Vol. XXX, pp. 3529–3542). Rosario, Argentina: AMCA.
- de la Torre, A., Pessano, H., Hierro, R., Santos, J. R., Llamado, P., & Alexander, P. (2015). The influence of topography on vertical velocity of air in relation to severe storms near the Southern Andes Mountains. *Atmospheric Research*, 156, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.12.020>
- Deshler, T. (2008). A review of global stratospheric aerosol: Measurements, importance, life cycle, and local stratospheric aerosol. *Atmospheric Research*, 90(2–4), 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.03.016>
- Echalar, F., Artaxo, P., Martins, J. V., Yamasoe, M., Gerab, F., & Maenhaut, W. (1998). Long-term monitoring of atmospheric aerosols in the Amazon Basin ' Source identification and apportionment marked with maxima of more than 100 /  $\mu\text{g m}^{-3}$  in the dry season . The high. *Journal of Geophysical Research*, 103(98). <https://doi.org/10.1029/98JD01749/pdf>
- Emmons, L. K., Walters, S., Hess, P. G., Lamarque, J. F., Pfister, G. G., Fillmore, D., ... Kloster, S. (2010). Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4). *Geoscientific Model Development*, 3(1), 43–67. <https://doi.org/10.5194/gmd-3-43-2010>
- Falcón. (2010). Microfísica de formación de nubes.
- Fast, J. D., Gustafson, W. I., Easter, R. C., Zaveri, R. A., Barnard, J. C., Chapman, E. G., ... Peckham, S. E. (2006). Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(21), 1–29. <https://doi.org/10.1029/2005JD006721>
- Fernandez, R. P., Allende, D. G., Castro, F., Cremades, P., & Puliafito, E. (2010). Modelado regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 43–50.
- Forster. (2007). *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis : Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Franck, U., Leitte, A. M., & Suppan, P. (2014). Multiple exposures to airborne pollutants and hospital admissions due to diseases of the circulatory system in Santiago de Chile. *Science of the Total Environment*, 468–469, 746–756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.088>
- Freitas, S. R. (2005). Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, 5(1–2), 135–167. <https://doi.org/10.1007/s10652-005-0243-7>
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Givati, A., & Rosenfeld, D. (2004). Quantifying Precipitation Suppression Due to Air Pollution. *Journal of Applied Meteorology*, 43(7), 1038–1056. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<1038:QPSDTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1038:QPSDTA>2.0.CO;2)
- Goliff, W. S., Stockwell, W. R., & Lawson, C. V. (2013). The regional atmospheric chemistry mechanism, version 2. *Atmospheric Environment*, 68(x), 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.038>

- Gonzalez, P. L. M. (2014). Summer precipitation variability over South America on long and short intraseasonal timescales. *Climate Dynamics*, 43(7–8), 1993–2007. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2023-2>
- Grell, G. A., & Devenyi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 10–13. <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. a., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957–6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- Guo, J., Liu, H., Li, Z., Rosenfeld, D., Jiang, M., Xu, W., ... Zhai, P. (2018). Aerosol-induced changes in the vertical structure of precipitation: A perspective of TRMM precipitation radar. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-18-13329-2018>
- Gustafson, W. I., Chapman, E. G., Ghan, S. J., Easter, R. C., & Fast, J. D. (2007). Impact on modeled cloud characteristics due to simplified treatment of uniform cloud condensation nuclei during NEAQS 2004. *Geophys. Res. Lett.*, 34, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL030021>
- Hansen, J. (1997). Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research*, 102(D6), 6831. <https://doi.org/10.1029/96JD03436>
- Hansen, J. (2005). Efficacy of climate forcings. *Journal of Geophysical Research*, 110(D18), D18104. <https://doi.org/10.1029/2005JD005776>
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J. R. G., & Sohlberg, R. (1998). *UMD Global Land Cover Classification, 1 Kilometer, 1.0e*. College Park, Maryland.
- Hao, W. M., & Liu, M.-H. (1994). Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 8(4), 495–503. <https://doi.org/10.1029/94GB02086>
- Harrison, R. M., & Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *Science of The Total Environment*, 249(1–3), 85–101. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00513-6](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6)
- Haywood, J., & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 38(4), 513–543. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>
- Hong, S. Y. (2010). A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(651), 1481–1496. <https://doi.org/10.1002/qj.665>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Jacobson, M. Z. (2005). *“Fundamentals of Atmospheric Modeling.”*
- Janjić, Z. I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
- Jirak, I. L., & Cotton, W. R. (2006). Effect of Air Pollution on Precipitation along the Front Range of the. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(2004), 236–245. <https://doi.org/10.1175/JAM2328.1>



- Jones, C. G. (1994). Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), 373. <https://doi.org/10.2307/3545850>
- Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170–181.
- Kain, J. S., & Fritsch, J. M. (1990). A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(23), 2784–2802. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2)
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 151(2), 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kerminen, V. M., Lihavainen, H., Komppula, M., Viisanen, Y., & Kulmala, M. (2005). Direct observational evidence linking atmospheric aerosol formation and cloud droplet activation. *Geophysical Research Letters*, 32(14), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL023130>
- Khain, A., Rosenfeld, D., & Pokrovsky, A. (2005). Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(611), 2639–2663. <https://doi.org/10.1256/qj.04.62>
- Kiehl, J. T., & Briegleb, B. P. (1993). The Relative Role of Sulfate Aerosols and Greenhouse Gases in Climate Forcing. *Science*, 260(April), 311–314--.
- Kiehl, J. T., Schneider, T. L., Rasch, P. J., Barth, M. C., & Wong, J. (2000). Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, Version 3. In *Aerosol Forcing of Climate* (Vol. 105, pp. 1441–1457). Wiley-Interscience.
- Kolb, C. E. (2002). Iodine 's air of importance, 417(June), 1–2.
- Koren, I., Dagan, G., & Altaratz, O. (2014). From aerosol-limited to invigoration of warm convective clouds. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1252595>
- Lee, S.-S. (2012). Effect of Aerosol on Circulations and Precipitation in Deep Convective Clouds, (2008). <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0111.1>
- Lee, W. L., & Liou, K. N. (2012). Effect of absorbing aerosols on snow albedo reduction in the Sierra Nevada. *Atmospheric Environment*, 55, 425–430. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.024>
- León, F. M., & Quirantes José Antonio. (2004). “Observación e identificación de nubes.” In *Meteorología y Climatología* (pp. 94–142).
- Loeb, N. G., & Schuster, G. L. (2008). An observational study of the relationship between cloud, aerosol and meteorology in broken low-level cloud conditions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(14), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2007JD009763>
- López, M. L. (2011). Elemental concentration and source identification of PM10 and PM2.5 by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5450–5457. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.003>
- Lopez Noreña, A., Pascual Flores, R., Bolaño Ortiz, T., Puliafito, E., & Fernandez, R. (2018). Aplicación de WRF-Chem en modelos de calidad del aire en América del Sur: Incorporación de inventarios de emisión y condiciones de borde globales vs. locales, 2–3.
- Lynn, B. (2005). Spectral (Bin) Microphysics Coupled with a Mesoscale Model (MM5). Part I: Model Description and First Results. *Monthly Weather Review*, 133(1), 44–58. <https://doi.org/10.1175/mwr-2840.1>

- Marengo. (2014). Working Paper Climate Change in Central and South, (September 2017).
- Martin, G. M., Johnson, D. W., & Spice, A. (1994). *The Measurement and Parameterization of Effective Radius of Droplets in Warm Stratocumulus Clouds*. *Journal of the Atmospheric Sciences* (Vol. 51). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<1823:TMAPOE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<1823:TMAPOE>2.0.CO;2)
- Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., & Bórquez, R. (2015). Earth ' s Future Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere Earth ' s Future. <https://doi.org/10.1002/2015EF000311>.Universitario
- Monn, C., Braendli, O., Schaeppi, G., Schindler, C., Ackermann-Liebrich, U., & Leuenberger, P. (1995). Particulate matter <math>\leq 10 \mu\text{m}</math> (PM<sub>10</sub>) and total suspended particulates (TSP) in urban, rural and alpine air in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 29(19), 2565–2573. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)94999-U](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(95)94999-U)
- Morrison, H. (2011). Indirect impact of atmospheric aerosols in idealized simulations of convective-radiative quasi equilibrium. Part II: Double-moment microphysics. *Journal of Climate*, 24(7), 1897–1912. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3647.1>
- Morrison, H., Curry, J. A., & Khvorostyanov, V. I. (2005). A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(6), 1665–1677. <https://doi.org/10.1175/JAS3446.1>
- Mulena, G. C., Allende, D. G., & Puliafito, Salvador Enrique. (2011). Resultados preliminares de la modelación de aerosoles volcánicos. Caso de estudio: volcán Puyehue. In *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 15 (p. 01.133-01.139). Río Hondo, Argentina: ISSN 0329-5184.
- Mulena, G. C., Allende, D. G., Puliafito, S. E., Lakkis, S. G., Cremades, P. G., & Ulke, A. G. (2016). Examining the influence of meteorological simulations forced by different initial and boundary conditions in volcanic ash dispersion modelling. *Atmospheric Research*, 176–177, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.009>
- NOAA-NGDC. (2010). Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series.
- Ohashi, Y., & Kida, H. (2002). Local Circulations Developed in the Vicinity of Both Coastal and Inland Urban Areas: A Numerical Study with a Mesoscale Atmospheric Model. *Journal of Applied Meteorology*, 41(1), 30–45. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0030:LCDITV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0030:LCDITV>2.0.CO;2)
- Olivier, J. G. J., Peters, J. A. H. W., Bakker, J., & Berdowski, J. J. (2002). Applications of EDGAR. Including a description of EDGAR 3.2. Reference database with trend data for 1970-1995. *Organización Meteorológica Mundial, O.-N. 544, 2015. Manual Del Sistema Mundial de Observación. Volumen I – Aspectos Mundiales. Anexo V Del Reglamento Técnico, Ginebra: OMM.*
- Pablo, C., Fernandez, R., Allende, D., Mulena, C., & Puliafito, E. (2017). High resolution satellite derived erodibility factors for WRF/Chem windblown dust simulations in Argentina. *Atmosfera*, 30(1), 11–25. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.01.02>
- Pan, H. L., & Mahrt, L. (1987). Interaction between soil hydrology and boundary-layer development. *Boundary-Layer Meteorology*, 38(1–2), 185–202. <https://doi.org/10.1007/BF00121563>
- Pappalardo, G., Amodeo, A., Amoroso, S., Mona, L., Pandolfi, M., & Cuomo, V. (2003). One year of tropospheric lidar measurements of aerosol extinction and backscatter. *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 46(2).
- Pascual Flores, R. M., Allende, D. G., Bolaño Ortiz, T. R., Ruggeri, M. F., Puliafito, S. E., & Lakkis, S.

- G. (2015). Evaluación estadística de simulación de precipitaciones en Los Andes Centrales usando WRF .
- Peckham, S. E. (2014). NOAA Technical Memorandum OAR ARL-####, (October). <https://doi.org/10.7289/V5BC3WG5>
- Peckham, S. E., Grell, G. a., McKeen, S. a., Ahmadov, Barth, M., Pfister, G., ... Freitas, S. R. (2012). *WRF/Chem Version 3.4 User's Guide*.
- Pennelly, C., Reuter, G., & Flesch, T. (2014). Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmospheric Research*, 135–136(June 2005), 172–192. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.09.004>
- Pérez, R. C. (n.d.). Considerations about the critical particles number in order to perform a correct cloud seeding ., (4).
- Pérez, R. C. (2013). *Física de los fenómenos atmosféricos y meteorológicos*.
- Pincus, R., & Baker, M. B. (1994). Effect of precipitation on the albedo susceptibility of clouds in the marine boundary layer. *Nature*, 372(6503), 250–252. <https://doi.org/10.1038/372250a0>
- Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V., & Nunziata, A. (2009). Effects of particulate matter (PM10, PM2.5 and PM1) on the cardiovascular system. *Toxicology*, 261(1–2), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.04.035>
- Pope, C. A. (2000). Review: Epidemiological Basis for Particulate Air Pollution Health Standards. *Aerosol Science and Technology*, 32(1), 4–14. <https://doi.org/10.1080/027868200303885>
- Puliafito, Salvador Enrique, Castro, Fernando Horacio, & Allende, D. G. (2011). Air quality impact of PM10 emission in urban centres. *International Journal of Environment and Pollution*, 46(3/4), 127–143. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2011.045476>
- Puliafito, S. E., Allende, D. G., Mulena, C. G., Cremades, P., & Lakkis, S. G. (2015). Evaluation of the WRF Model Configuration for Zonda Wind Events in a Complex Terrain. *Atmospheric Research*, 166, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.011>
- Puliafito, S. E., Allende, D. G., Pinto, S., & Castesana, P. (2015). High resolution inventory of GHG emissions of the road transport sector in Argentina. *Atmospheric Environment*, 101, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.040>
- Puliafito, S. E., Castesana, P. S., Allende, D. G., Ruggeri, M. F., Pinto, S., Pascual Flores, R. M., ... Fernandez, R. P. (2017). High-Resolution Atmospheric Emission Inventory of the Argentine Enery Sector. *19th EGU General Assembly*, 19, 5564. Retrieved from <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-5564-1.pdf>
- Puliafito, S. E., Castro, F., & Allende, D. TRANSPORTE Y CALIDAD DEL AIRE EN MENDOZA INFORME N ° 3 : Emisiones del transporte urbano de pasajeros Agosto 2011 Resumen En los informes anteriores se presentó un detalle metodológico y una estimación de las (2011).
- Raju, M. P., Safai, P. D., Vijayakumar, K., Devara, P. C. S., Naidu, C. V, Rao, P. S. P., & Pandithurai, G. (2015). Atmospheric abundances of black carbon aerosols and their radiative impact over an urban and a rural site in SW India. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.023>
- Ramanathan, V. (2007). Atmospheric brown clouds: Hemispherical and regional variations in long-range transport, absorption, and radiative forcing. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(22), 1–26. <https://doi.org/10.1029/2006JD008124>
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Lelieveld, J., Mitra, A. P., Althausen, D., Anderson, J., ... Valero, F.

- P. J. (2001). Indian Ocean Experiment : An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze carbon emerge as the major, 106.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Lelieveld, J., Mitra, A. P., Althausen, D., Anderson, J., ... Valero, F. P. J. (2001). Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D22), 28371–28398. <https://doi.org/10.1029/2001JD900133>
- Randles. (2017). The MERRA-2 Aerosol Reanalysis , 1980 Onward . Part I : System Description and Data Assimilation Evaluation, 2, 6823–6850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>
- Rivera, J. A., Marianetti, G., & Hinrichs, S. (2018). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, 213(January), 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>
- Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.ENVSOFT.2017.06.025>
- Rosenfeld. (2007). Simulation of hurricane response to suppression of warm rain by sub-micron aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(13), 3411–3424. <https://doi.org/10.5194/acp-7-3411-2007>
- Rosenfeld, D. (1999). TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophysical Research Letters*, 26(20), 3105–3108. <https://doi.org/10.1029/1999GL006066>
- Rosenfeld, D. (2000). Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. *Science*, 287(5459), 1793–1796. <https://doi.org/10.1126/science.287.5459.1793>
- Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B., O'Dowd, C. D., Kulmala, M., Fuzzi, S., ... Andreae, M. O. (2008). Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? *Science (New York, N.Y.)*, 321(5894), 1309–1313. <https://doi.org/10.1126/science.1160606>
- Santos, R., Norte, F., Moreiras, S., Araneo, D., & Simonelli, S. (2015). AREA MONTAÑOSA DEL NOROESTE DE LA PROVINCIA DE MENDOZA , ARGENTINA PRECIPITATION EVENTS PREDICTION THAT CAUSES DEBRIS FLOW AND LANDSLIDES OVER MOUNTAINOUS AREA ON NORWEST REGION OF MENDOZA PROVINCE , ARGENTINA, 40(1), 65–75.
- Schiavone, J. F. & Fernandez, R. P. (2018). REDIMENSIONAMIENTO ESPACIAL Y TEMPORAL DE EMISIONES NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS.
- Seinfeld, & Spyros. (n.d.). *Atmospheric Chemistry and Physics*.
- Shepherd, J. M., & Burian, S. J. (2003). Detection of Urban-Induced Rainfall Anomalies in a Major Coastal City. *Earth Interactions*, 7(4), 1–17. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:DOUIRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:DOUIRA>2.0.CO;2)
- Skamarock. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *Technical Report*, (June), 113. <https://doi.org/10.5065/D6DZ069T>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research*.
- Song, Q., Chelton, D. B., Esbensen, S. K., Thum, N., & O'Neill, L. W. (2009). Coupling between Sea Surface Temperature and Low-Level Winds in Mesoscale Numerical Models. *Journal of Climate*, 22(1), 146–164. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2488.1>

- Stanek, L. W., Sacks, J. D., Dutton, S. J., & Dubois, J.-J. B. (2011). Attributing health effects to apportioned components and sources of particulate matter: An evaluation of collective results. *Atmospheric Environment*, 45(32), 5655–5663. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.023>
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stevens, B., & Feingold, G. (2009). Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature08281>
- Stjern, C. (2015). Contrasting Influences of Recent Aerosol Changes on Clouds and Precipitation in Europe and East Asia, 8770–8790. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00837.1>
- Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., & Tang, X. (1990). The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research*, 95(D10), 16343. <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16343>
- Tang, J., Wang, P., Mickley, L. J., Xia, X., Liao, H., Yue, X., ... Xia, J. (2014). Positive relationship between liquid cloud droplet effective radius and aerosol optical depth over Eastern China from satellite data. *Atmospheric Environment*, 84, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.024>
- Tombrou, M., Bossioli, E., Kalogiros, J., Allan, J. D., Bacak, a., Biskos, G., ... Szabó-Takács, B. (2015). Physical and chemical processes of air masses in the Aegean Sea during Etesians: Aegean-GAME airborne campaign. *Science of The Total Environment*, 506–507, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.098>
- Twomey, S. (1977). The Influence of Pollution on the Shortwave Albedo of Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2)
- Twomey, S. (1991). Aerosols, clouds and radiation. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 25(11), 2435–2442. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90159-5](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90159-5)
- U.S. EPA. (1987). *Second Addendum to Air Quality Criteria for Particulate Matter and Sulfur Oxides (1982): Assessment of Newly Available Health Effects Information (1986)*.
- U.S. EPA. (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, Oct 2004)*.
- U.S. Geological Survey. (2017). Earth Explorer.
- Vendrasco, E. P., Silva Dias, P. L., & Freitas, E. D. (2009). A case study of the direct radiative effect of biomass burning aerosols on precipitation in the Eastern Amazon. *Atmospheric Research*, 94(3), 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.06.016>
- Vera, C., & Silvestri, G. (2009). Precipitation interannual variability in South America from the WCRP-CMIP3 multi-model dataset. *Climate Dynamics*, 32(7–8), 1003–1014. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0534-7>
- Viale and Nuñez. (2011). Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics, 481–507. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1284.1>
- Viale, M., & Norte, F. (2009). Strong Cross-Barrier Flow under Stable Conditions Producing Intense Winter Orographic Precipitation : A Case Study over the Subtropical Central Andes, (1999), 1009–1031. <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222168.1>

- Viana Rodríguez, M. del M., Querol Carceller, X., Alastuey, A., Salas, R. (Salas R., Universitat de Barcelona. Departament de Geoquímica, P. i P. G., & Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias*. TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/1972>
- Wang, F., Guo, J., Zhang, J., Huang, J., Min, M., Chen, T., ... Li, X. (2015). Multi-sensor quantification of aerosol-induced variability in warm clouds over eastern China. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.063>
- Warner, J. (1968). A Reduction in Rainfall Associated with Smoke from Sugar-Cane Fires—An Inadvertent Weather Modification? *Journal of Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1968\)007<0247:ARIRAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1968)007<0247:ARIRAW>2.0.CO;2)
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13), 2088–2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>
- Yang, J., Kang, S., & Ji, Z. (2018). Sensitivity Analysis of Chemical Mechanisms in the WRF-Chem Model in Reconstructing Aerosol Concentrations and Optical Properties in the Tibetan Plateau, 505–521. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.05.0156>
- Yang, M., Huebert, B. J., Blomquist, B. W., Howell, S. G., Shank, L. M., McNaughton, C. S., ... Collett, J. L. (2011). Atmospheric sulfur cycling in the southeastern Pacific-longitudinal distribution, vertical profile, and diel variability observed during VOCALS-REx. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(10), 5079–5097. <https://doi.org/10.5194/acp-11-5079-2011>
- Zaveri, R. A. (1999). A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D23), 30387–30415. <https://doi.org/10.1029/1999JD900876>
- Zaveri, R. A. (2008). Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry (MOSAIC). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(13), 1–29. <https://doi.org/10.1029/2007JD008782>
- Zaveri, R. A., & Peters, L. K. (1999). A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D23), 30387–30415. <https://doi.org/10.1029/1999JD900876>
- Zhang, C., Wang, Y., & Hamilton, K. (2011). Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF Using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme\*. *Monthly Weather Review*, 139(11), 3489–3513. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05091.1>
- Zhang, L., Gong, S., Padro, J., & Barrie, L. (2001). A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, 35.
- Zhang, Q. (2011). Impact of aerosol composition on cloud condensation nuclei activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(8), 3783–3790. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3783-2012>